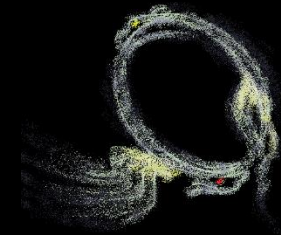


BIF 0442 / 5721 – FUNDAMENTOS DE TD

Potencial Eletroquímico

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



$$\zeta = \mu + zF\phi$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



$$\zeta = \mu + zF\phi$$

potencial químico

valência do íon

constante de Faraday

potencial elétrico

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



$$\zeta = \mu + zF\phi$$

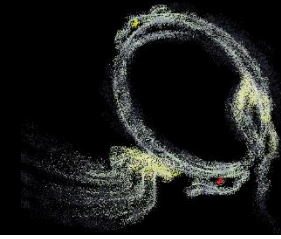
J mol⁻¹

adimensional

96.485,33212 coulombs mol⁻¹

volts

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



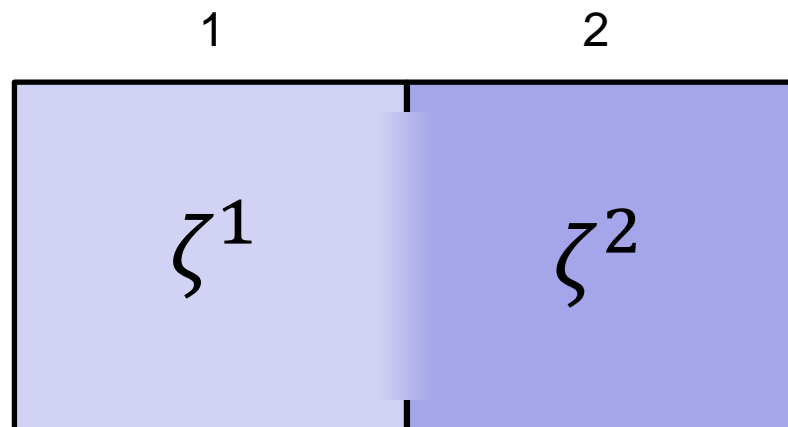
$$\zeta = \mu + zF\phi$$

O potencial pode ser definido para cada espécie envolvida no sistema
(não vamos fazer esta indexação por simplicidade)

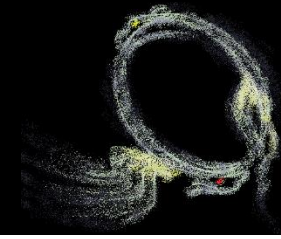
POTENCIAL ELETROQUÍMICO



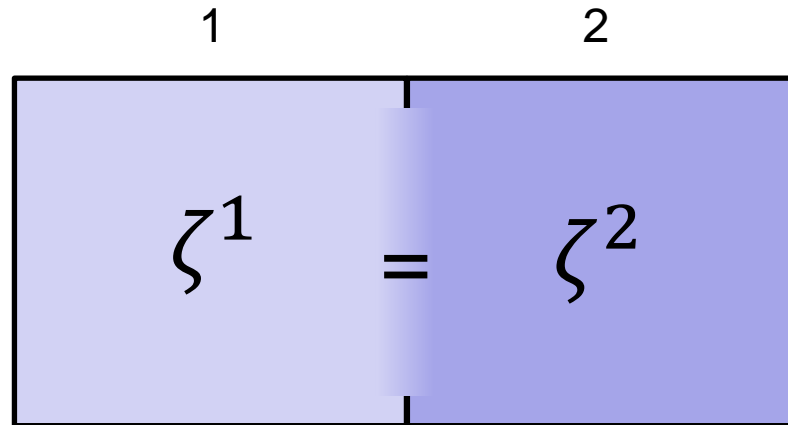
Considere 2 meios:



POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Em equilíbrio:

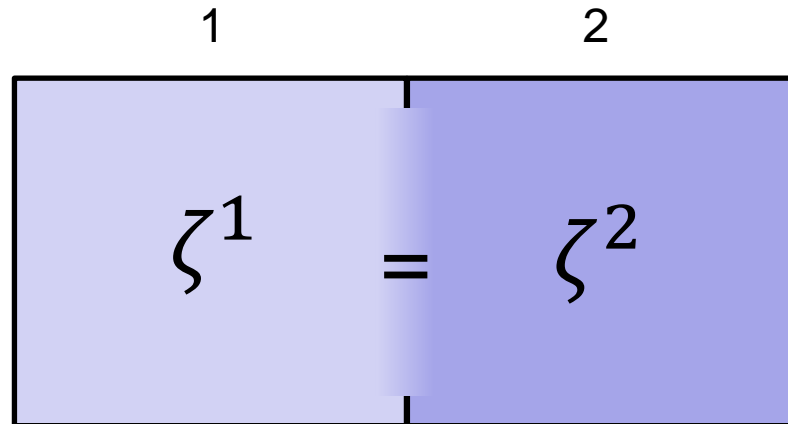


$$\mu^2 - \mu^1 + zF(\phi^2 - \phi^1) = 0$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Em equilíbrio:

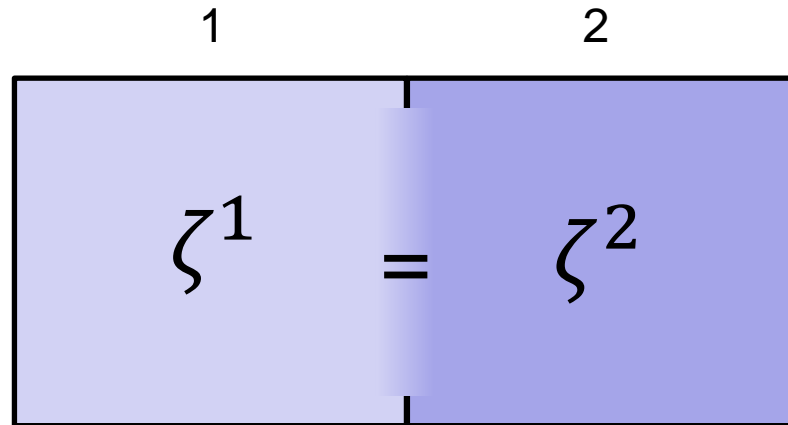


$$\Delta\phi = \frac{\mu^2 - \mu^1}{zF}$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO

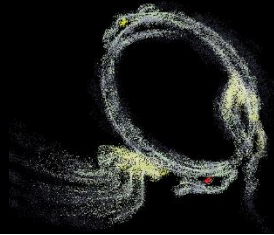


Em equilíbrio:



$$\Delta\phi = \frac{\mu^2 - \mu^1}{zF} \quad \longrightarrow \quad \text{volts}$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



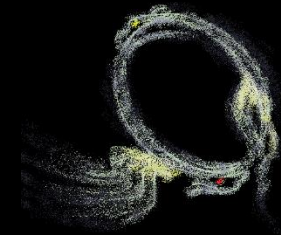
Obtendo μ

$$PV = nRT$$

$$P = \frac{n}{V}RT = CRT$$

$$PdV = CRTdV$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Obtendo μ

$$PV = nRT$$

$$P = \frac{n}{V}RT = CRT$$

$$PdV = CRTdV$$

δw

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Obtendo μ

$$PV = nRT$$

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

$$P = \frac{n}{V}RT = CRT$$

$$dV = \frac{Cdn - ndC}{C^2}$$

$$PdV = CRTdV$$

δw

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Obtendo μ

$$PV = nRT$$

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

$$P = \frac{n}{V}RT = CRT$$

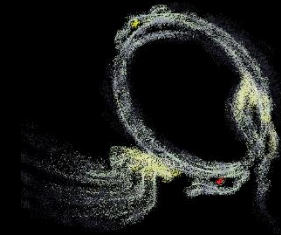
$$dV = \frac{Cdn - ndC}{C^2}$$

$$\delta w = PdV = CRTdV$$

δw

$$\delta w = CRT \left(\frac{dn}{C} - \frac{ndC}{C^2} \right)$$

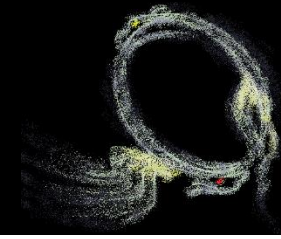
POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Obtendo μ

$$\delta w = RTdn - nRT \frac{dC}{C}$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO

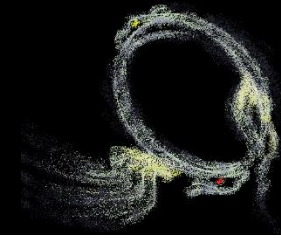


Obtendo μ

$$\delta w = \cancel{RTdn} + nRT \frac{dC}{C}$$

Como o sistema está em equilíbrio, não há alteração no número de mols

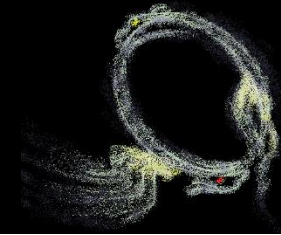
POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Obtendo μ

$$\frac{\delta w}{n} = -RT \frac{dC}{C}$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO



Obtendo μ

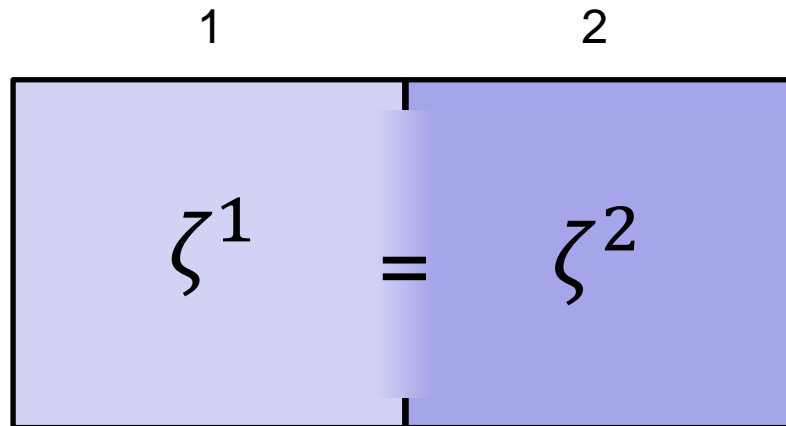
$$\frac{\delta w}{n} = -RT \frac{dC}{C} \quad \xrightarrow{\text{integrando}} \quad \frac{W}{n} = -RT \ln(C) + m_0$$

POTENCIAL ELETROQUÍMICO

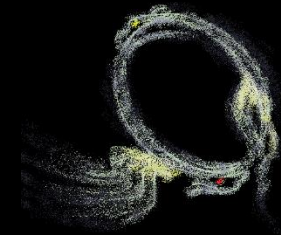


Obtendo μ

$$\mu^i = -RT \ln(C^i) + m_0$$



POTENCIAL ELETROQUÍMICO

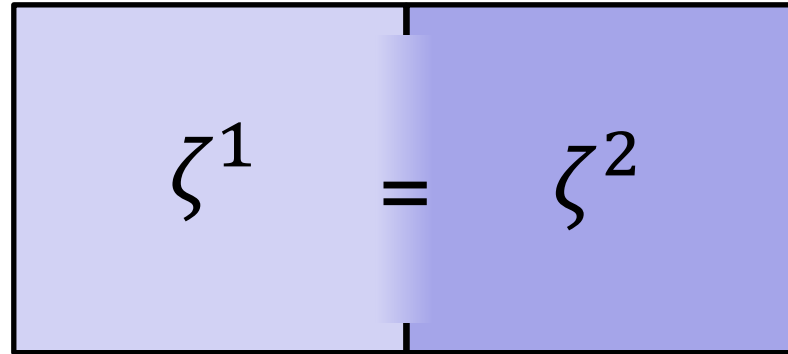
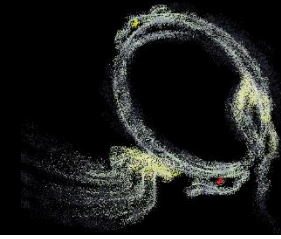


Inserindo-se esse resultado no potencial elétrico de equilíbrio

$$\mu^i = -RT \ln(C^i) + m_0$$

$$\Delta\phi = \frac{\mu^2 - \mu^1}{zF} = \frac{RT}{zF} \cdot \ln\left(\frac{C^2}{C^1}\right)$$

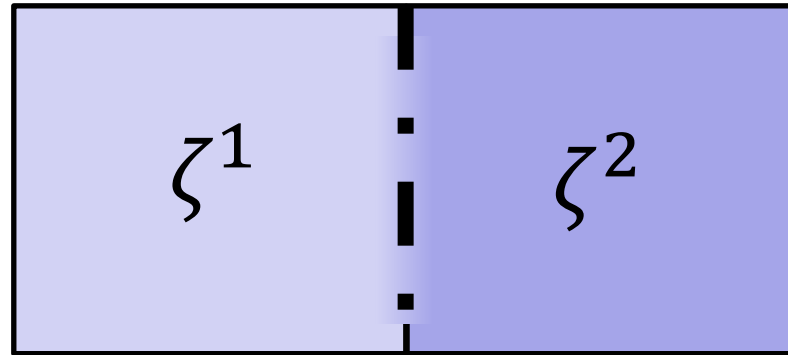
POTENCIAL ELETROQUÍMICO



$$\Delta\phi = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left(\frac{C^2}{C^1} \right)$$

∴ ∃ UMA DDP ELÉTRICA (VOLTAGEM) ENTRE OS MEIOS EM DECORRÊNCIA DA MANUTENÇÃO DE UMA DIFERENÇA DE CONCENTRAÇÃO ENTRE ESTES

POTENCIAL ELETROQUÍMICO

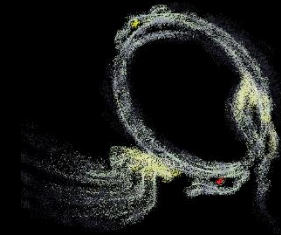


$$E = 2,3026 \cdot \frac{RT}{zF} \cdot \log_{10} \left(\frac{[externa]}{[interna]} \right)$$

$$E = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left(\frac{[externa]}{[interna]} \right)$$

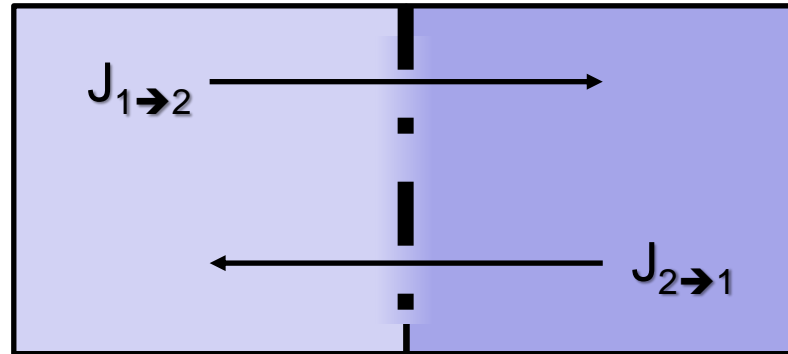
A equação de Nerst é o potencial eletroquímico aplicado a uma membrana que separa dois meios com diferentes concentrações sendo mantidas entre estes

MISSÃO



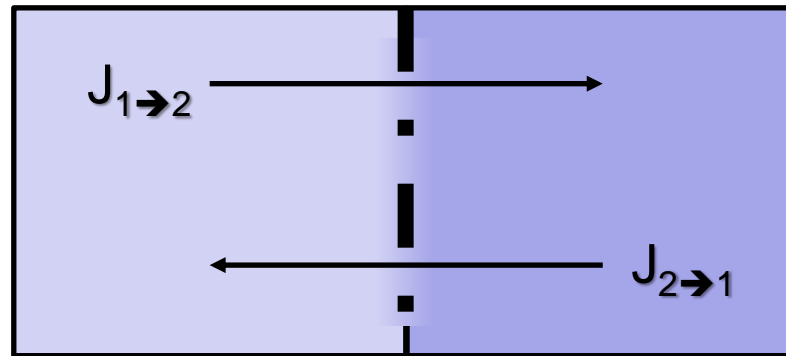
- Estudar a equação de Goldman para o potencial de membrana.
- Explicar o potencial de ação de um neurônio a partir dela.

POTENCIAL ELETROQUÍMICO – CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO MACROSCÓPICO



$$J_{1 \rightarrow 2} = J_{2 \rightarrow 1}$$

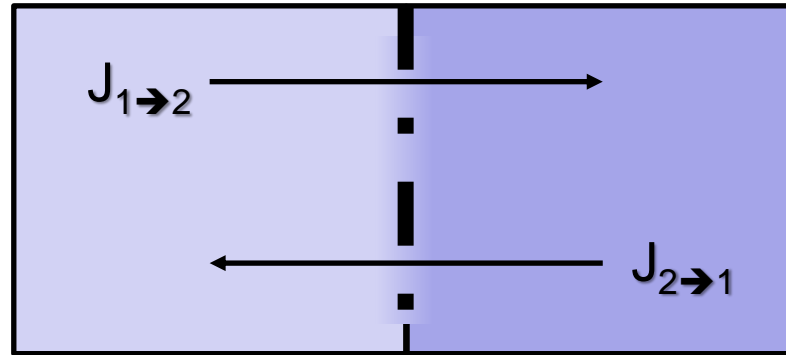
POTENCIAL ELETROQUÍMICO – CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO MACROSCÓPICO



$$J_{1 \rightarrow 2} = J_{2 \rightarrow 1}$$

Note que não sabemos nada acerca das concentrações nem do potencial elétrico, neste momento.

POTENCIAL ELETROQUÍMICO – CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO MACROSCÓPICO

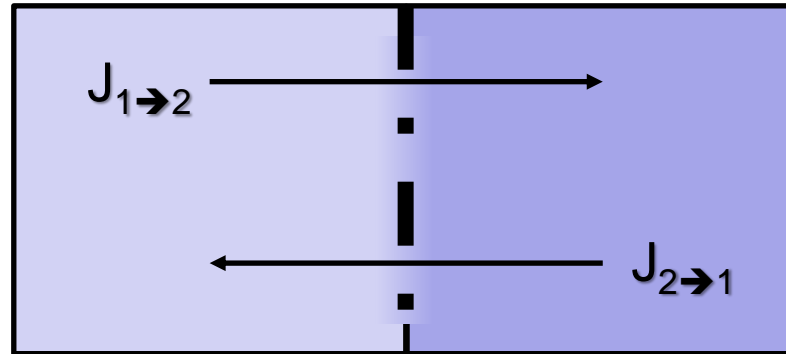


$$J_{1 \rightarrow 2} = J_{2 \rightarrow 1}$$

Há dois fluxos concomitantes:

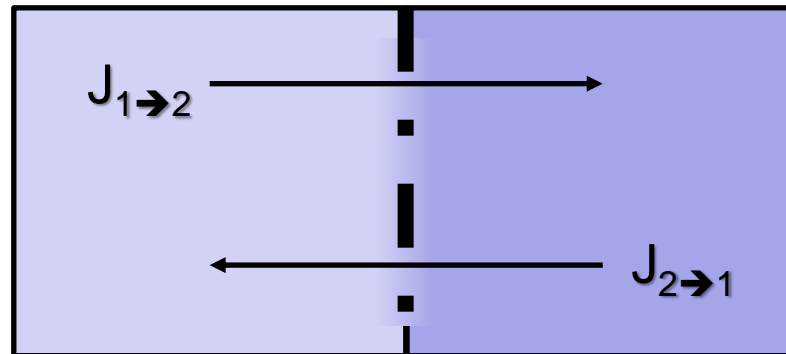
1. Fluxo do íon i devido à diferença de concentração (este é o fluxo difusivo)
2. Fluxo de cargas q_i que acompanha o fluxo do íon (esta é a corrente elétrica)

FLUXO ELETROQUÍMICO



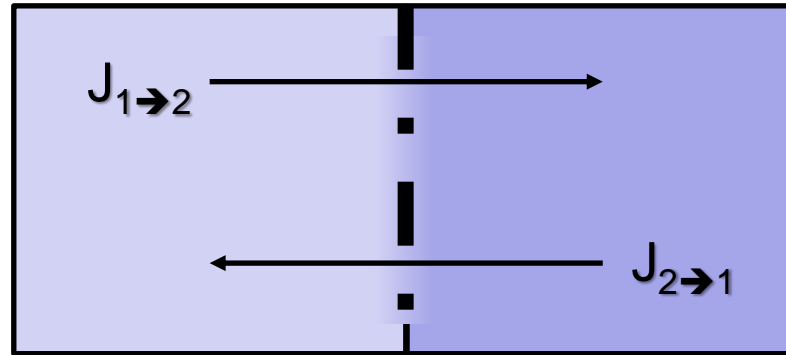
$$J_i = J_{1 \rightarrow 2} - J_{2 \rightarrow 1}$$

FLUXO ELETROQUÍMICO



$$J_i = E \frac{F z_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{F z_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{F z_i}{RT}}}$$

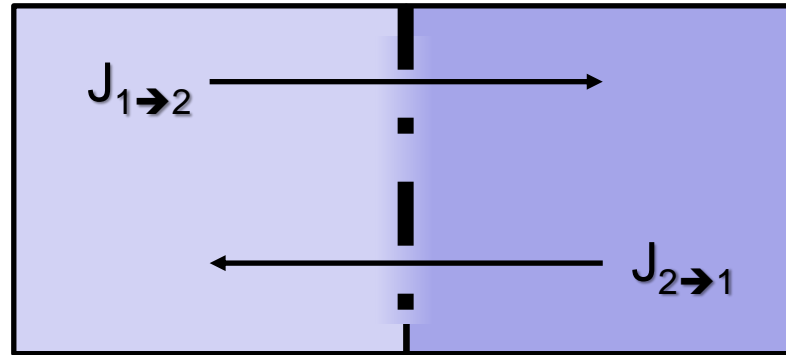
FLUXO ELETROQUÍMICO



valência do íon

$$J_i = E \frac{F z_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{F z_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{F z_i}{RT}}}$$

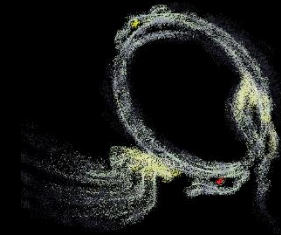
FLUXO ELETROQUÍMICO



$$J_i = E \frac{F z_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{F z_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{F z_i}{RT}}}$$

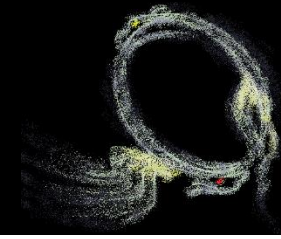
permeabilidade (condutância) ao íon

FLUXO ELETROQUÍMICO – EQUILÍBRIO



$$J_i = E \frac{Fz_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{Fz_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{Fz_i}{RT}}} = 0$$

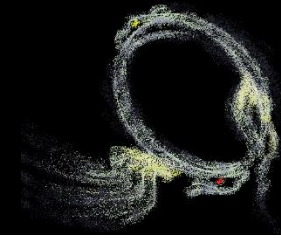
FLUXO ELETROQUÍMICO – EQUILÍBRIO



$$J_i = E \frac{Fz_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{Fz_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{Fz_i}{RT}}} = 0$$

$$i_2 - i_1 e^{E \frac{Fz_i}{RT}} = 0$$

FLUXO ELETROQUÍMICO – EQUILÍBRIO

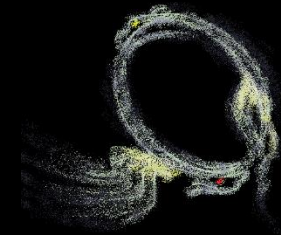


$$J_i = E \frac{Fz_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{Fz_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{Fz_i}{RT}}} = 0$$

$$i_2 - i_1 e^{E \frac{Fz_i}{RT}} = 0$$

$$e^{E \frac{Fz_i}{RT}} = \frac{i_2}{i_1}$$

FLUXO ELETROQUÍMICO – EQUILÍBRIO



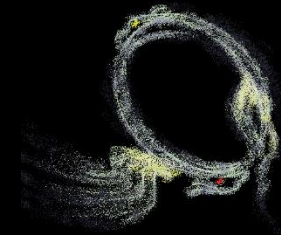
$$J_i = E \frac{F z_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{F z_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{F z_i}{RT}}} = 0$$

$$i_2 - i_1 e^{E \frac{F z_i}{RT}} = 0$$

$$e^{E \frac{F z_i}{RT}} = \frac{i_2}{i_1}$$

$$E = \frac{RT}{F z_i} \ln \left(\frac{i_2}{i_1} \right)$$

FLUXO ELETROQUÍMICO – EQUILÍBRIO



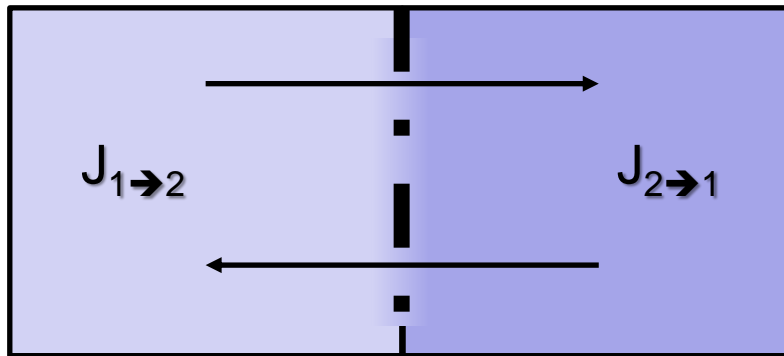
$$J_i = E \frac{F z_i}{RT} g_i \frac{i_2 - i_1 e^{E \frac{F z_i}{RT}}}{1 - e^{E \frac{F z_i}{RT}}} = 0$$

$$i_2 - i_1 e^{E \frac{F z_i}{RT}} = 0$$

$$E = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left(\frac{[externa]}{[interna]} \right)$$

$$E = \frac{RT}{F z_i} \ln \left(\frac{i_2}{i_1} \right)$$

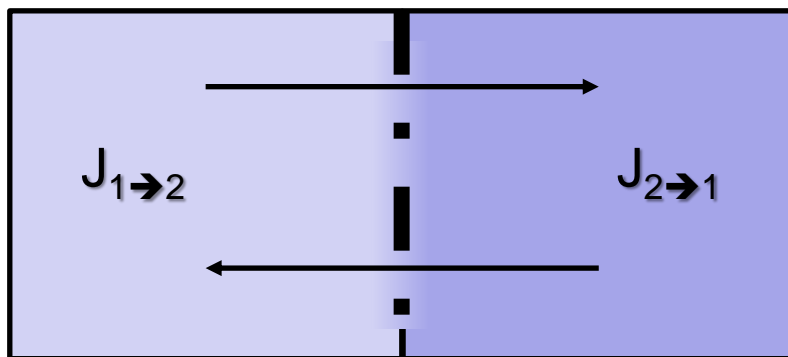
FLUXO ELETROQUÍMICO – MAIS QUE UMA ESPÉCIE ENVOLVIDA



$$J_a = E \frac{Fz_a}{RT} g_a \frac{a_2 - a_1 e^{E \frac{Fz_a}{RT}}}{1 - e^{E \frac{Fz_a}{RT}}}$$

$$J_b = E \frac{Fz_b}{RT} g_b \frac{b_2 - b_1 e^{E \frac{Fz_b}{RT}}}{1 - e^{E \frac{Fz_b}{RT}}}$$

FLUXO ELETROQUÍMICO – MAIS QUE UMA ESPÉCIE ENVOLVIDA



$$J_a = E \frac{Fz_a}{RT} g_a \frac{a_2 - a_1 e^{E \frac{Fz_a}{RT}}}{1 - e^{E \frac{Fz_a}{RT}}}$$

$$J_b = E \frac{Fz_b}{RT} g_b \frac{b_2 - b_1 e^{E \frac{Fz_b}{RT}}}{1 - e^{E \frac{Fz_b}{RT}}}$$

Na condição de equilíbrio, a soma dos fluxos é nula (o potencial elétrico é o mesmo para todas as espécies envolvidas)

$$J_a + J_b = 0$$

por simplificação, vamos considerar a mesma valência

FLUXO ELETROQUÍMICO – MAIS QUE UMA ESPÉCIE ENVOLVIDA



$$J_a + J_b = 0$$

$$E \frac{Fz}{RT(1 - e^{E\frac{Fz}{RT}})} \left[g_a \left(a_2 - a_1 e^{E\frac{Fz a}{RT}} \right) + g_b \left(b_2 - b_1 e^{E\frac{Fz}{RT}} \right) \right] = 0$$

FLUXO ELETROQUÍMICO – MAIS QUE UMA ESPÉCIE ENVOLVIDA



$$J_a + J_b = 0$$

$$E \frac{Fz}{RT(1 - e^{E\frac{Fz}{RT}})} \left[g_a \left(a_2 - a_1 e^{E\frac{Fz}{RT}} \right) + g_b \left(b_2 - b_1 e^{E\frac{Fz}{RT}} \right) \right] = 0$$

$$e^{E\frac{Fz}{RT}} (g_a a_1 + g_b b_1) = g_a a_2 + g_b b_2$$

FLUXO ELETROQUÍMICO – MAIS QUE UMA ESPÉCIE ENVOLVIDA



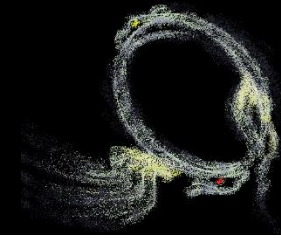
$$J_a + J_b = 0$$

$$E \frac{Fz}{RT(1 - e^{E\frac{Fz}{RT}})} \left[g_a \left(a_2 - a_1 e^{E\frac{Fz}{RT}} \right) + g_b \left(b_2 - b_1 e^{E\frac{Fz}{RT}} \right) \right] = 0$$

$$e^{E\frac{Fz}{RT}} (g_a a_1 + g_b b_1) = g_a a_2 + g_b b_2$$

$$E \frac{Fz}{RT} = \ln \left(\frac{g_a a_2 + g_b b_2}{g_a a_1 + g_b b_1} \right)$$

EQUAÇÃO DE GOLDMAN



$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_a a_2 + g_b b_2}{g_a a_1 + g_b b_1} \right)$$

potencial de membrana

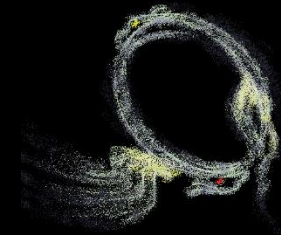
EQUAÇÃO DE GOLDMAN



$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_a a_2 + g_b b_2}{g_a a_1 + g_b b_1} \right)$$

para duas espécies iônicas de mesma valência

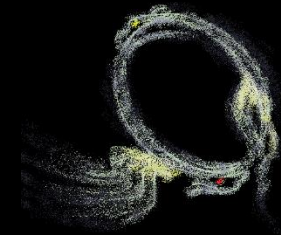
EQUAÇÃO DE GOLDMAN – EXEMPLO DO POTENCIAL DE AÇÃO



Vamos supor Na^+ e K^+ , sendo “2” o lado externo

$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_{\text{Na}} \text{Na}_{ext} + g_{\text{K}} \text{K}_{ext}}{g_{\text{Na}} \text{Na}_{int} + g_{\text{K}} \text{K}_{int}} \right)$$

EQUAÇÃO DE GOLDMAN – EXEMPLO DO POTENCIAL DE AÇÃO

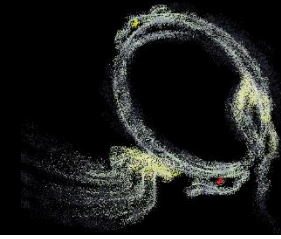


Vamos supor Na^+ e K^+ , sendo “2” o lado externo

$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_{\text{Na}} \text{Na}_{ext} + g_{\text{K}} \text{K}_{ext}}{g_{\text{Na}} \text{Na}_{int} + g_{\text{K}} \text{K}_{int}} \right)$$

Na condição de repouso da membrana, as condutâncias são tais que o potencial se encontra ao redor de -60 mV

EQUAÇÃO DE GOLDMAN – EXEMPLO DO POTENCIAL DE AÇÃO



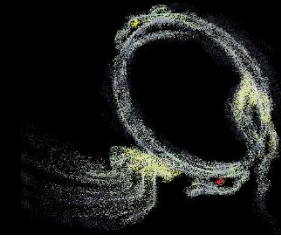
$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_{Na} Na_{ext} + g_K K_{ext}}{g_{Na} Na_{int} + g_K K_{int}} \right)$$

No axônio, se o potencial de membrana atinge um limiar, há o disparo de um potencial de ação, com aumento intenso da condutância ao sódio.

Assim, o potencial de membrana se aproxima de:

$$E_m \cong 26,7 \ln \left(\frac{135}{15} \right) \cong +58 \text{ mV} \quad \text{potencial de repouso do Na}^+$$

EQUAÇÃO DE GOLDMAN – EXEMPLO DO POTENCIAL DE AÇÃO

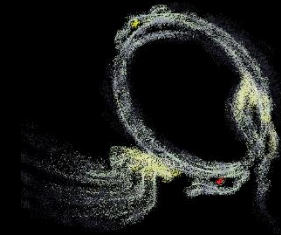


$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_{Na} Na_{ext} + g_K K_{ext}}{g_{Na} Na_{int} + g_K K_{int}} \right)$$

Em seguida, a condutância ao sódio diminui, a condutância ao potássio aumenta muito e o potencial de membrana se aproxima de:

$$E_m \cong 26,7 \ln \left(\frac{4}{130} \right) \cong -90 \text{ mV} \quad \text{potencial de repouso do K}^+$$

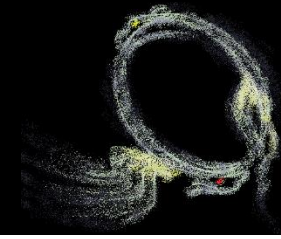
EQUAÇÃO DE GOLDMAN – EXEMPLO DO POTENCIAL DE AÇÃO



$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_{Na} Na_{ext} + g_K K_{ext}}{g_{Na} Na_{int} + g_K K_{int}} \right)$$

Posteriormente, as condutâncias retornam aos valores de repouso e o potencial de membrana retorna ao potencial de repouso (-60 mV).

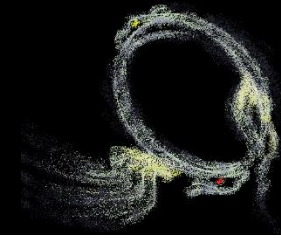
EQUAÇÃO DE GOLDMAN – EXEMPLO DO POTENCIAL DE AÇÃO



$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_{Na} Na_{ext} + g_K K_{ext}}{g_{Na} Na_{int} + g_K K_{int}} \right)$$

Posteriormente, as condutâncias retornam aos valores de repouso e o potencial de membrana retorna ao potencial de repouso (-60 mV). Durante o processo, as quantidades de íons envolvidas são mínimas, pois a carga elétrica é grande. Portanto, as concentrações se alteram muito pouco.

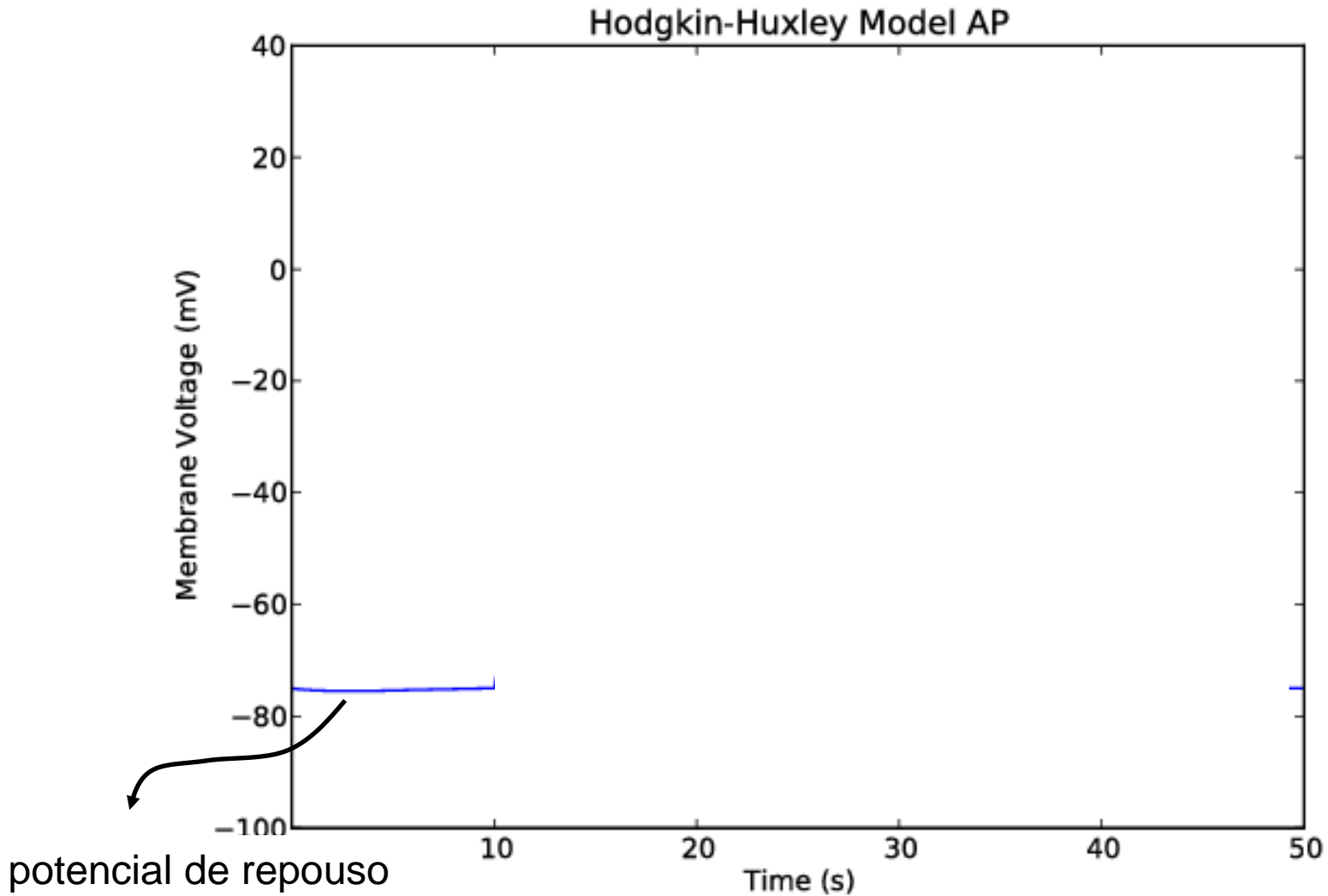
EQUAÇÃO DE GOLDMAN – EXEMPLO DO POTENCIAL DE AÇÃO



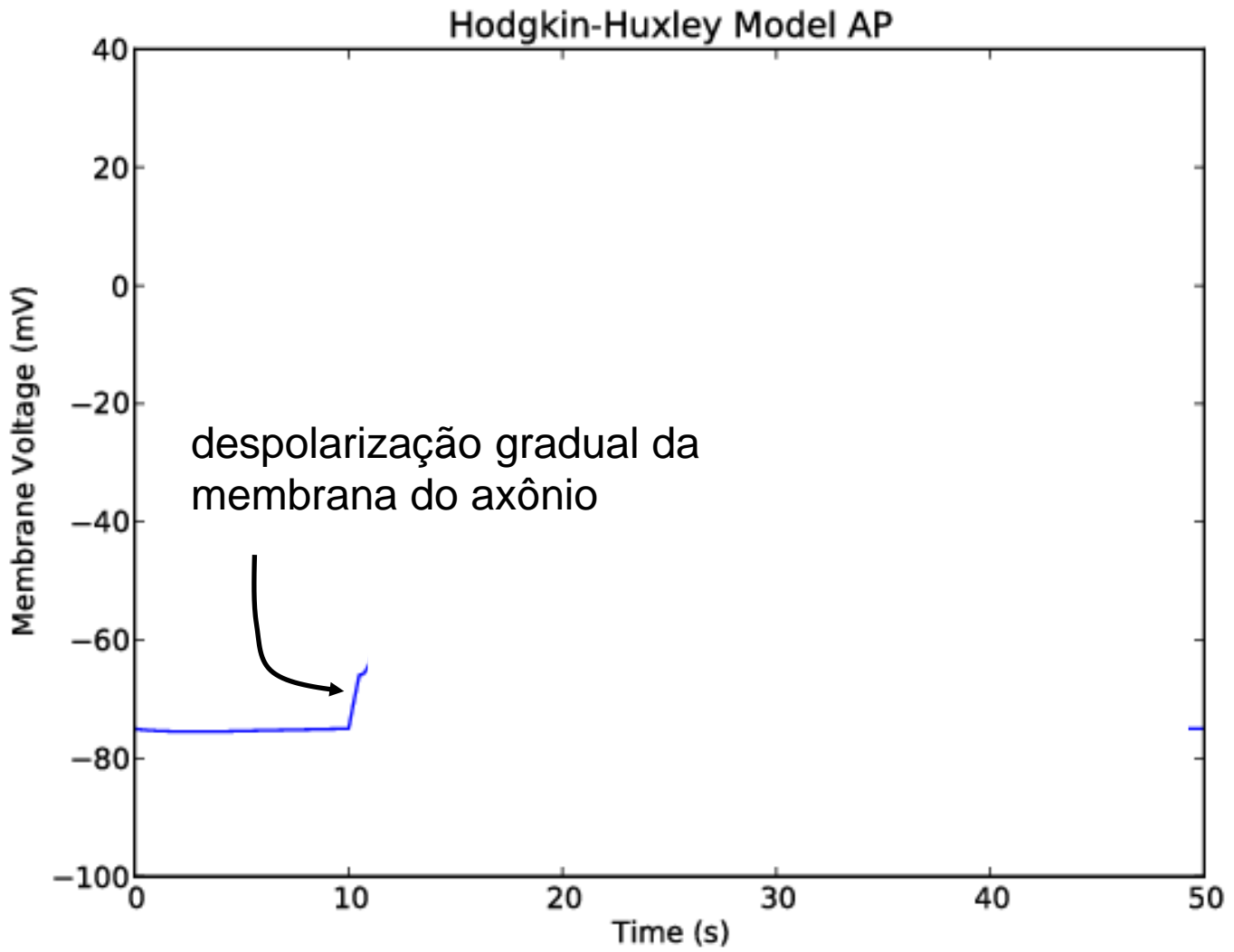
$$E_m = \frac{RT}{Fz} \ln \left(\frac{g_{Na} Na_{ext} + g_K K_{ext}}{g_{Na} Na_{int} + g_K K_{int}} \right)$$

Posteriormente, as condutâncias retornam aos valores de repouso e o potencial de membrana retorna ao potencial de repouso (-60 mV). Durante o processo, as quantidades de íons envolvidas são mínimas, pois a carga elétrica é grande. Portanto, as concentrações se alteram muito pouco. As concentrações são reestabelecidas pela bomba de Na⁺/K⁺, com constante de tempo muito maior que a do potencial de ação.

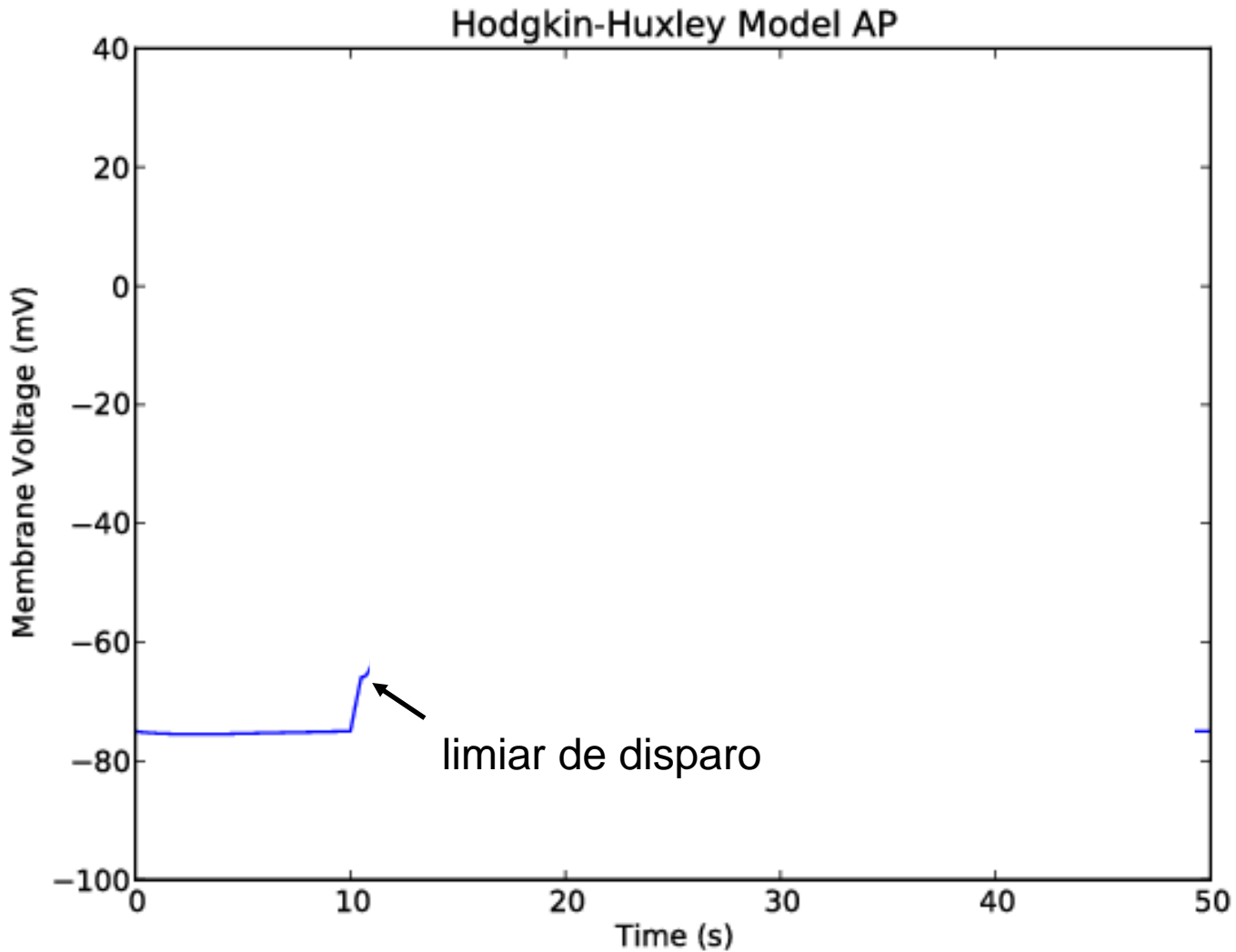
O POTENCIAL DE AÇÃO



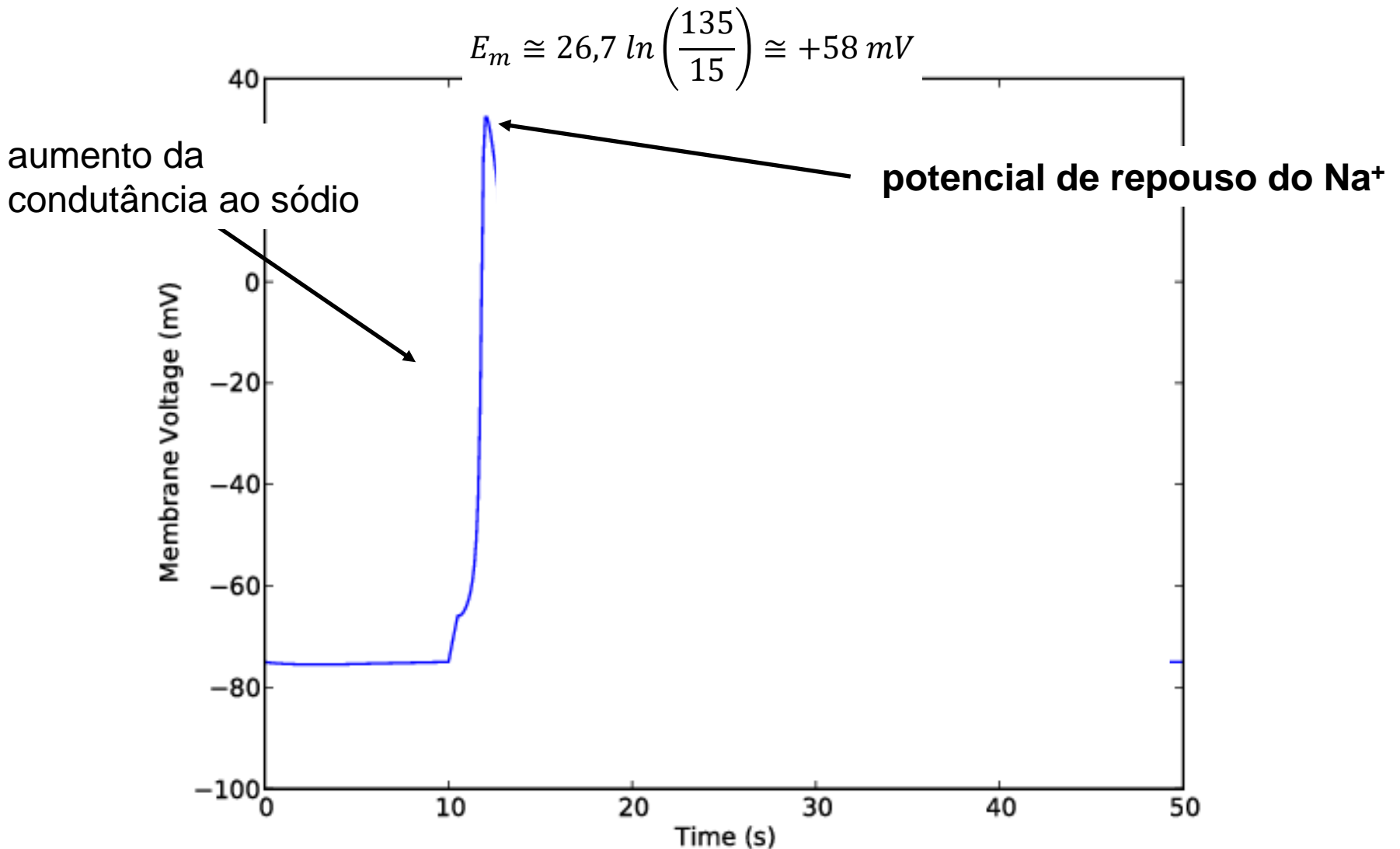
O POTENCIAL DE AÇÃO



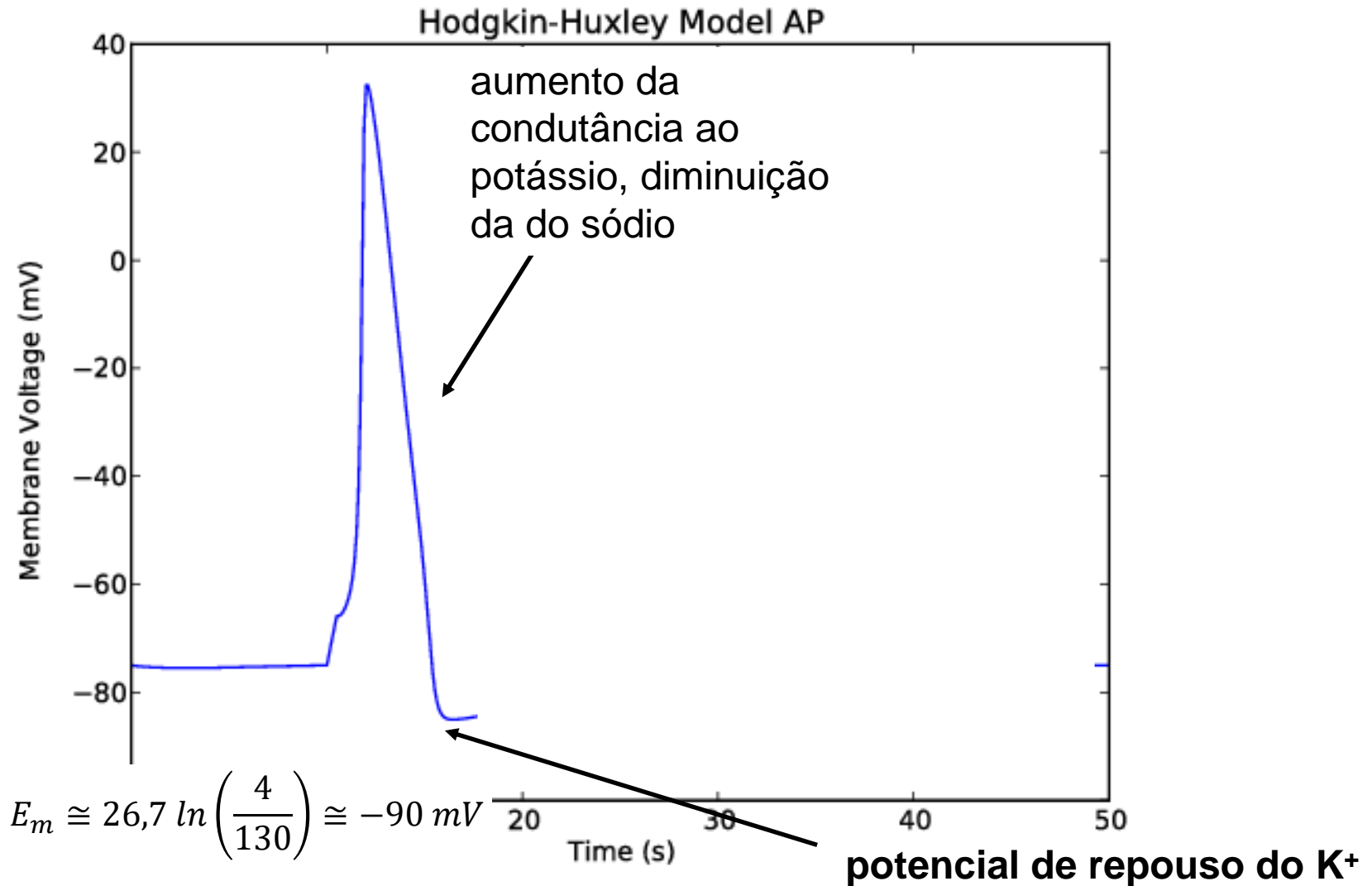
O POTENCIAL DE AÇÃO



O POTENCIAL DE AÇÃO



O POTENCIAL DE AÇÃO



O POTENCIAL DE AÇÃO

