

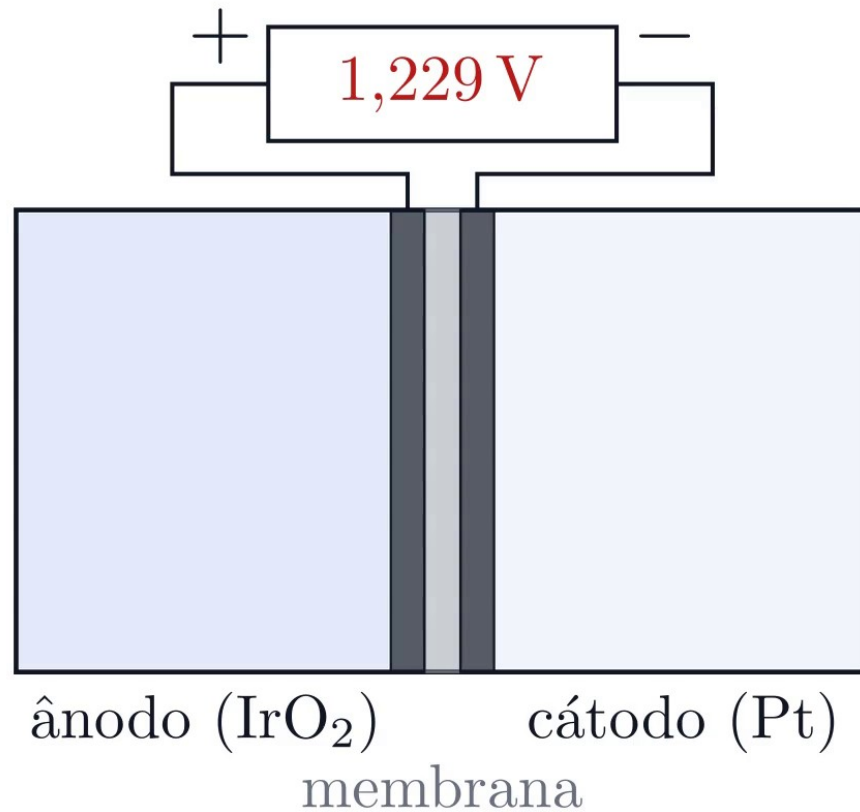
Tópicos Avançados em Ciências – Química Inorgânica Avançada

Aula 01 – Eletroquímica
Da célula ao eletrodo em operação
James Moraes de Almeida



O enigma: quanto custa separar a água?

Na tensão que a termodinâmica cobra, 1,229 V:



A pergunta da aula

- A termodinâmica cobra 1,229 V para separar a água. A célula do vídeo mede 1,57 V a 1 A/cm², a 80 °C.

A pergunta da aula

- A termodinâmica cobra 1,229 V para separar a água. A célula do vídeo mede 1,57 V a 1 A/cm^2 , a 80°C .
- A aula constrói, nesta ordem, as ferramentas que fecham a conta:

A pergunta da aula

- A termodinâmica cobra 1,229 V para separar a água. A célula do vídeo mede 1,57 V a 1 A/cm^2 , a 80°C .
- A aula constrói, nesta ordem, as ferramentas que fecham a conta:
 - o trabalho elétrico e o potencial de eletrodo;

A pergunta da aula

- A termodinâmica cobra 1,229 V para separar a água. A célula do vídeo mede 1,57 V a 1 A/cm^2 , a 80°C .
- A aula constrói, nesta ordem, as ferramentas que fecham a conta:
 - o trabalho elétrico e o potencial de eletrodo;
 - a equação de Nernst, que leva a tensão a 80°C e 0,53 bar;

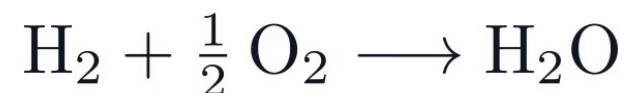
- A termodinâmica cobra 1,229 V para separar a água. A célula do vídeo mede 1,57 V a 1 A/cm^2 , a $80 \text{ }^\circ\text{C}$.
- A aula constrói, nesta ordem, as ferramentas que fecham a conta:
 - o trabalho elétrico e o potencial de eletrodo;
 - a equação de Nernst, que leva a tensão a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e 0,53 bar;
 - Butler-Volmer, a cinética da interface;

- A termodinâmica cobra 1,229 V para separar a água. A célula do vídeo mede 1,57 V a 1 A/cm^2 , a 80°C .
- A aula constrói, nesta ordem, as ferramentas que fecham a conta:
 - o trabalho elétrico e o potencial de eletrodo;
 - a equação de Nernst, que leva a tensão a 80°C e 0,53 bar;
 - Butler-Volmer, a cinética da interface;
 - Tafel, que lê essa cinética nos dados do artigo.

A célula e o potencial de eletrodo

$$U = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{237\,100 \text{ J/mol}}{2 \times 96\,485 \text{ C/mol}} = 1,229 \text{ V}$$

No sentido espontâneo, o da célula a combustível, a reação é a inversa:



e a convenção usual põe o sinal na relação: a célula entrega os mesmos 1,229 V.

$$\Delta G = -nFU$$

- Ânodo: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Cátodo: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$.

- Ânodo: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Cátodo: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$.
- A tensão mínima é energia livre por carga: $U = \Delta G/nF$.

- Ânodo: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Cátodo: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$.
- A tensão mínima é energia livre por carga: $U = \Delta G/nF$.
 - $F = 96485 \text{ C/mol}$ é a constante de Faraday: a carga de um mol de elétrons.

- Ânodo: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Cátodo: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$.
- A tensão mínima é energia livre por carga: $U = \Delta G/nF$.
 - $F = 96485 \text{ C/mol}$ é a constante de Faraday: a carga de um mol de elétrons.
 - No sentido espontâneo, o da célula a combustível, a convenção usual é $\Delta G = -nFU$.

O exercício de 2025, de volta

- Termodinâmica Avançada 2025, Aula 6, o exemplo da eletrólise:

- Termodinâmica Avançada 2025, Aula 6, o exemplo da eletrólise:
 - “O valor do ΔG molar para a decomposição de um mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ para $\text{H}_2(\text{g})$ e $\text{O}_2(\text{g})$ a 1 bar e 298,15 K é de 237,1 kJ/mol. Calcule a voltagem mínima necessária para decompor 1 mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ com eletrólise.”

- Termodinâmica Avançada 2025, Aula 6, o exemplo da eletrólise:
 - “O valor do ΔG molar para a decomposição de um mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ para $\text{H}_2(\text{g})$ e $\text{O}_2(\text{g})$ a 1 bar e 298,15 K é de 237,1 kJ/mol. Calcule a voltagem mínima necessária para decompor 1 mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ com eletrólise.”
- O trabalho elétrico nFU igualado a ΔG , com $n = 2$:

- Termodinâmica Avançada 2025, Aula 6, o exemplo da eletrólise:
 - “O valor do ΔG molar para a decomposição de um mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ para $\text{H}_2(\text{g})$ e $\text{O}_2(\text{g})$ a 1 bar e 298,15 K é de 237,1 kJ/mol. Calcule a voltagem mínima necessária para decompor 1 mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ com eletrólise.”
- O trabalho elétrico nFU igualado a ΔG , com $n = 2$:
 - $U = \Delta G/nF = 237100 \text{ J/mol} / (2 \times 96485 \text{ C/mol}) = 1,229 \text{ V}$

- Termodinâmica Avançada 2025, Aula 6, o exemplo da eletrólise:
 - “O valor do ΔG molar para a decomposição de um mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ para $\text{H}_2(\text{g})$ e $\text{O}_2(\text{g})$ a 1 bar e 298,15 K é de 237,1 kJ/mol. Calcule a voltagem mínima necessária para decompor 1 mol de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ com eletrólise.”
- O trabalho elétrico nFU igualado a ΔG , com $n = 2$:
 - $U = \Delta G/nF = 237100 \text{ J/mol} / (2 \times 96485 \text{ C/mol}) = 1,229 \text{ V}$
 - O que em 2025 era a resposta é, nesta aula, o primeiro degrau da escada do enigma.

- O eletrodo padrão de hidrogênio (EPH): Pt em H^+ com atividade 1 e H_2 a 1 bar, $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$. Por convenção, ele está em 0 V.

- O eletrodo padrão de hidrogênio (EPH): Pt em H^+ com atividade 1 e H_2 a 1 bar, $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$. Por convenção, ele está em 0 V.
 - No laboratório usam-se referências conferidas contra ele: o Ag/AgCl, a +0,222 V com Cl^- de atividade 1, e o eletrodo reversível de hidrogênio, o mesmo par H^+/H_2 no pH da própria solução.

- O eletrodo padrão de hidrogênio (EPH): Pt em H^+ com atividade 1 e H_2 a 1 bar, $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$. Por convenção, ele está em 0 V.
 - No laboratório usam-se referências conferidas contra ele: o Ag/AgCl, a +0,222 V com Cl^- de atividade 1, e o eletrodo reversível de hidrogênio, o mesmo par H^+/H_2 no pH da própria solução.
- Contra o eletrodo padrão de hidrogênio: $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ a +1,229 V e H^+/H_2 a 0 V. A diferença é de novo 1,229 V, por outra tabela.

- O eletrodo padrão de hidrogênio (EPH): Pt em H^+ com atividade 1 e H_2 a 1 bar, $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$. Por convenção, ele está em 0 V.
 - No laboratório usam-se referências conferidas contra ele: o Ag/AgCl, a +0,222 V com Cl^- de atividade 1, e o eletrodo reversível de hidrogênio, o mesmo par H^+/H_2 no pH da própria solução.
- Contra o eletrodo padrão de hidrogênio: $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ a +1,229 V e H^+/H_2 a 0 V. A diferença é de novo 1,229 V, por outra tabela.
 - O mesmo par de ferro, com água e com cianeto como ligantes: +0,771 V e +0,358 V. O ligante desloca o potencial em 0,413 V, ou 39,8 kJ/mol.

E o pH? Cada eletrodo tem o seu Q , e o H^+ está nele.

Para $O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O$, com O_2 a 1 bar:

$$E = 1,229 \text{ V} - \frac{RT}{4F} \ln \frac{1}{a_{H^+}^4} = 1,229 \text{ V} + \frac{RT}{F} \ln a_{H^+}$$

Nernst na célula de eletrólise

- $U = U^{\circ} + (RT/nF) \ln Q$

- $U = U^{\circ} + (RT/nF) \ln Q$
- Para um eletrodo, escrito como redução: $E = E^{\circ} - (RT/nF) \ln Q$.

- $U = U^\circ + (RT/nF) \ln Q$
- Para um eletrodo, escrito como redução: $E = E^\circ - (RT/nF) \ln Q$.
- Na eletrólise, o quociente de reação é $Q = p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{1/2}$, com os gases em bar e a água líquida de atividade 1.

- $U = U^\circ + (RT/nF) \ln Q$
- Para um eletrodo, escrito como redução: $E = E^\circ - (RT/nF) \ln Q$.
- Na eletrólise, o quociente de reação é $Q = p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{1/2}$, com os gases em bar e a água líquida de atividade 1.
 - Atividade: a composição medida contra o estado padrão. Gás, $p/(1 \text{ bar})$; soluto, $c/(1 \text{ mol/L})$; líquido puro, 1. Por isso, com as pressões em bar, o Q de atividades vira o Q de pressões.

- $U = U^\circ + (RT/nF) \ln Q$
- Para um eletrodo, escrito como redução: $E = E^\circ - (RT/nF) \ln Q$.
- Na eletrólise, o quociente de reação é $Q = p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{1/2}$, com os gases em bar e a água líquida de atividade 1.
 - Atividade: a composição medida contra o estado padrão. Gás, $p/(1 \text{ bar})$; soluto, $c/(1 \text{ mol/L})$; líquido puro, 1. Por isso, com as pressões em bar, o Q de atividades vira o Q de pressões.
 - O H^+ entra no Q de cada eletrodo: os dois potenciais caem 59,16 mV por unidade de pH, e a diferença, a tensão da célula, não muda.

Nernst a 80 °C, na célula do artigo

- Temperatura, pela entropia de reação: $dU^\circ/dT = -\Delta S^\circ/nF = -0,846$ mV/K.

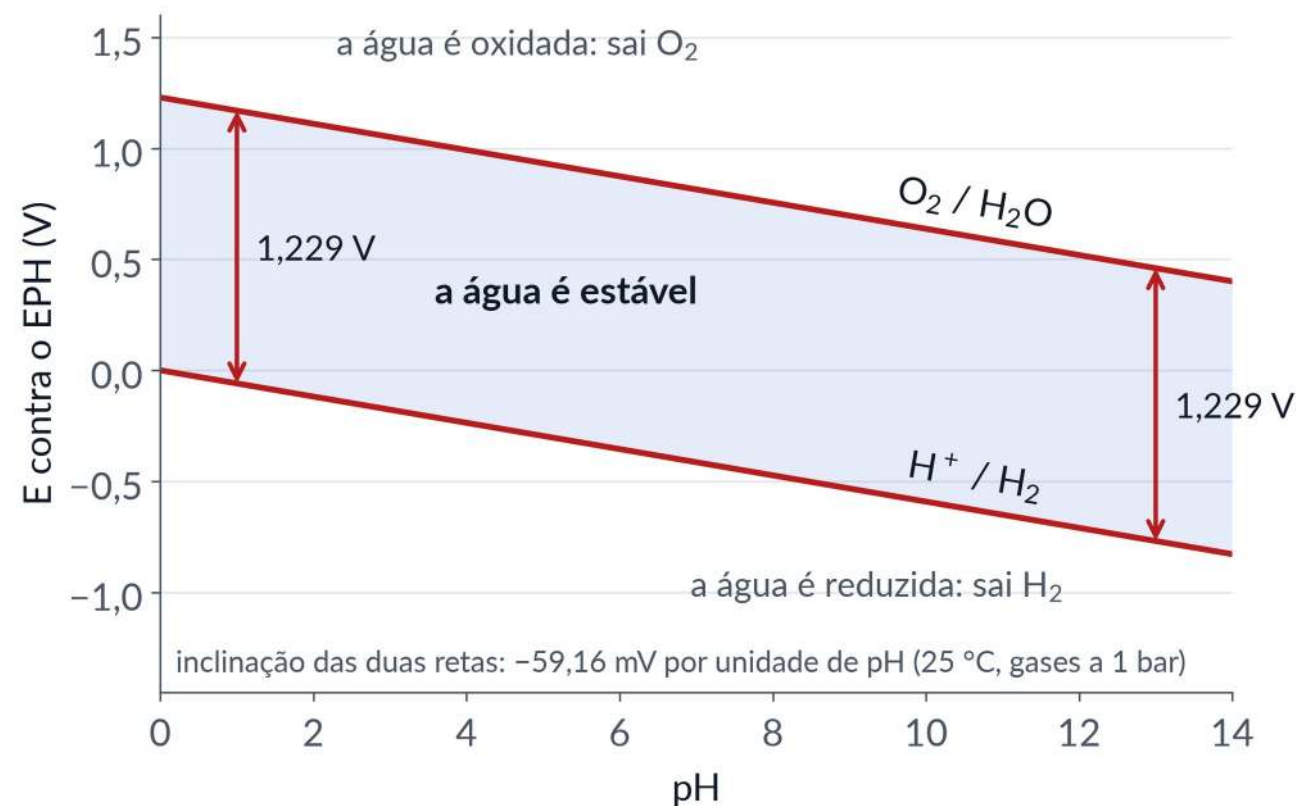
Nernst a 80 °C, na célula do artigo

- Temperatura, pela entropia de reação: $dU^\circ/dT = -\Delta S^\circ/nF = -0,846$ mV/K.
 - $U = 1,1825 \text{ V} + 0,01522 \text{ V} \times \ln(0,53 \times 0,53^{1/2}) = 1,168 \text{ V}$

- Temperatura, pela entropia de reação: $dU^\circ/dT = -\Delta S^\circ/nF = -0,846$ mV/K.
 - $U = 1,1825 \text{ V} + 0,01522 \text{ V} \times \ln(0,53 \times 0,53^{1/2}) = 1,168 \text{ V}$
 - É o valor que Bernt e Gasteiger (2016) calculam para a célula, a 80 °C e 0,53 bar.

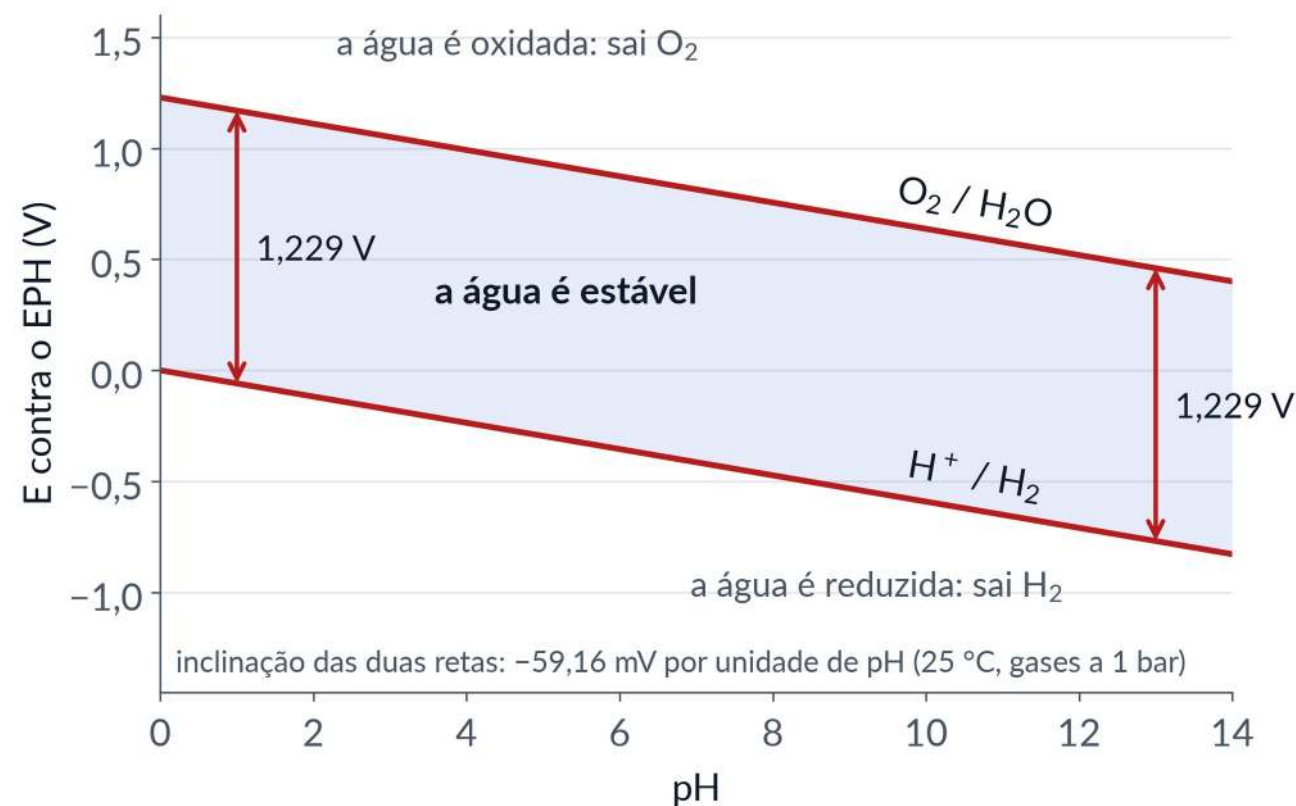
O diagrama de Pourbaix da água

- Potencial de eletrodo contra pH, com as fronteiras de estabilidade da água: o diagrama de Pourbaix.



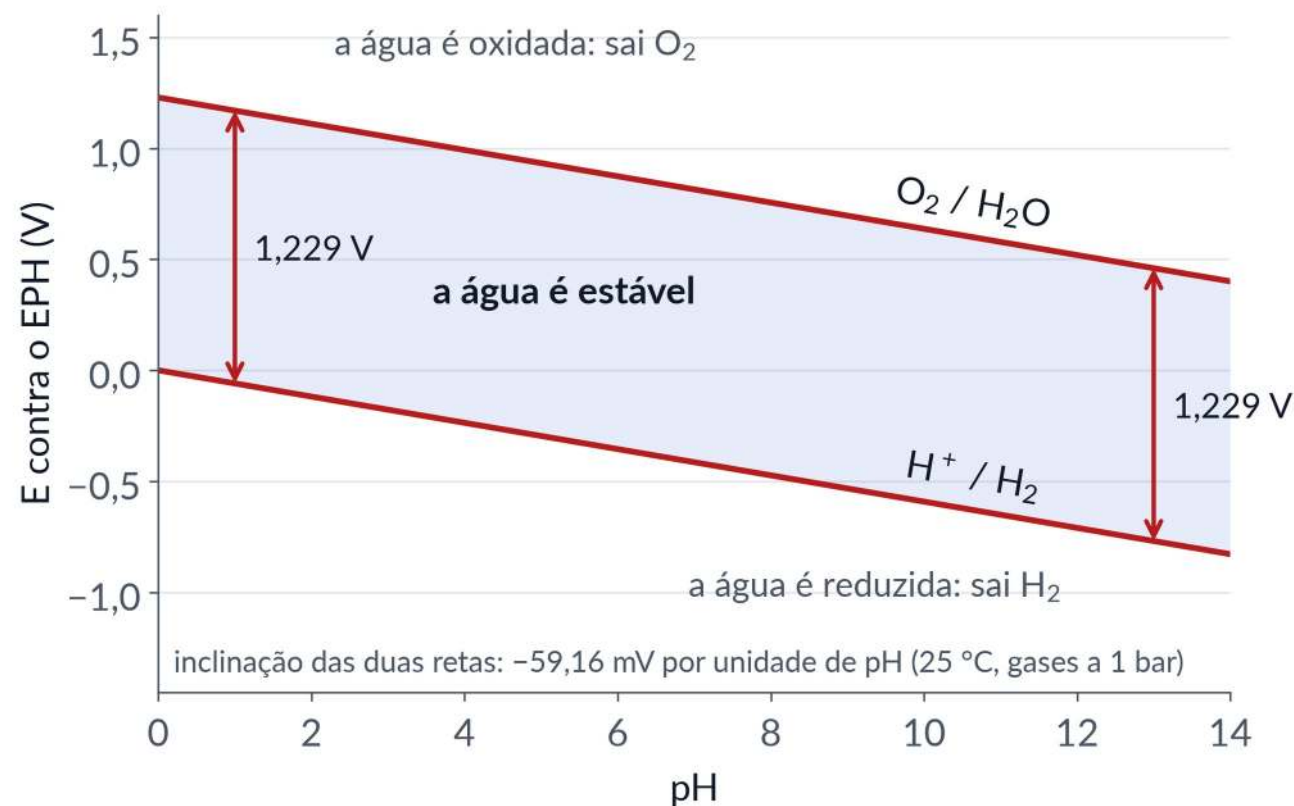
O diagrama de Pourbaix da água

- Potencial de eletrodo contra pH, com as fronteiras de estabilidade da água: o diagrama de Pourbaix.
- Cada reta é Nernst para um eletrodo, e as duas caem 59,16 mV por unidade de pH a 25 °C.



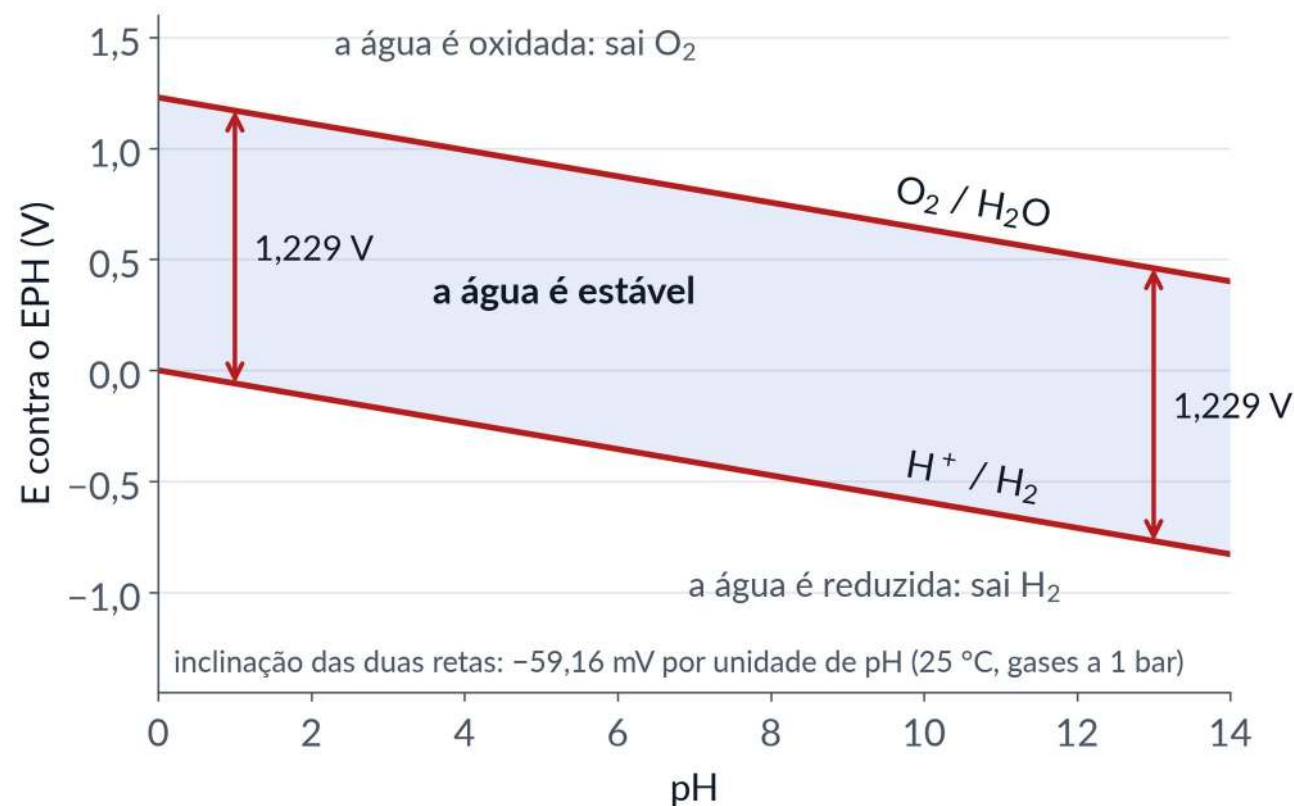
O diagrama de Pourbaix da água

- Potencial de eletrodo contra pH, com as fronteiras de estabilidade da água: o diagrama de Pourbaix.
 - Cada reta é Nernst para um eletrodo, e as duas caem 59,16 mV por unidade de pH a 25 °C.
 - Entre as retas a água é estável; acima, oxida-se a O_2 ; abaixo, reduz-se a H_2 .



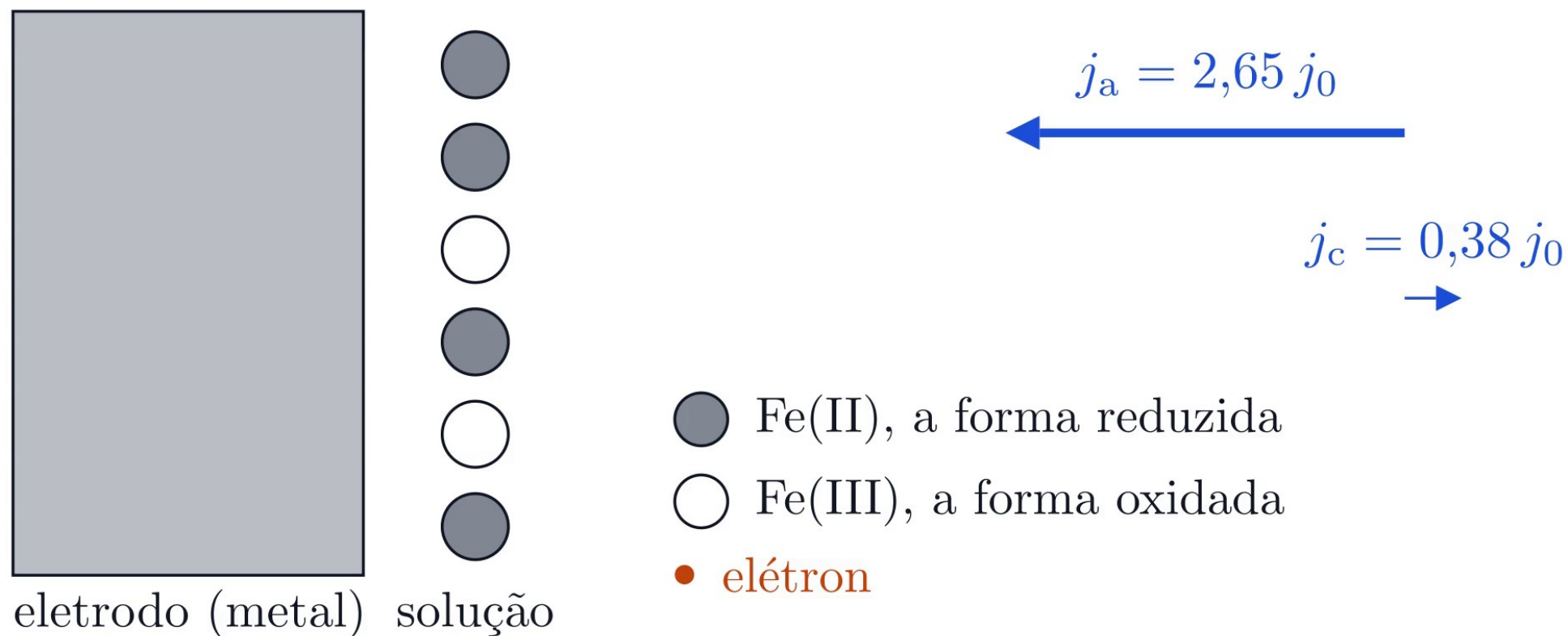
O diagrama de Pourbaix da água

- Potencial de eletrodo contra pH, com as fronteiras de estabilidade da água: o diagrama de Pourbaix.
 - Cada reta é Nernst para um eletrodo, e as duas caem 59,16 mV por unidade de pH a 25 °C.
 - Entre as retas a água é estável; acima, oxida-se a O_2 ; abaixo, reduz-se a H_2 .
- A distância é sempre 1,229 V: a célula PEM, em meio ácido, e a alcalina, em pH 14, têm a mesma tensão reversível.



O eletrodo fora do equilíbrio

Por que 50 mV mudam tanto a taxa? A resposta está na barreira.



- $j = j_0 [\exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT)]$

- $j = j_0 [\exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT)]$
- j_0 : a corrente que corre em cada sentido no equilíbrio.

- $j = j_0 [\exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT)]$
- j_0 : a corrente que corre em cada sentido no equilíbrio.
- Sobretenção: $\eta = E - E_{eq}$, o quanto o eletrodo sai do equilíbrio.

- $j = j_0 [\exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT)]$
- j_0 : a corrente que corre em cada sentido no equilíbrio.
- Sobreensão: $\eta = E - E_{eq}$, o quanto o eletrodo sai do equilíbrio.
- Um η anódico baixa o estado $Ox + e^-$ por $F\eta$; a barreira de oxidação cai $\alpha_a F\eta$ e a de redução sobe $\alpha_c F\eta$; α_a e α_c são os coeficientes de transferência.

- $j = j_0 [\exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT)]$
- j_0 : a corrente que corre em cada sentido no equilíbrio.
- Sobreensão: $\eta = E - E_{eq}$, o quanto o eletrodo sai do equilíbrio.
- Um η anódico baixa o estado $Ox + e^-$ por $F\eta$; a barreira de oxidação cai $\alpha_a F\eta$ e a de redução sobe $\alpha_c F\eta$; α_a e α_c são os coeficientes de transferência.
- Hipótese desta forma: junto ao eletrodo, a concentração é a mesma do bulk da solução.

- $j = j_0 [\exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT)]$
- j_0 : a corrente que corre em cada sentido no equilíbrio.
- Sobretenção: $\eta = E - E_{eq}$, o quanto o eletrodo sai do equilíbrio.
- Um η anódico baixa o estado $Ox + e^-$ por $F\eta$; a barreira de oxidação cai $\alpha_a F\eta$ e a de redução sobe $\alpha_c F\eta$; α_a e α_c são os coeficientes de transferência.
- Hipótese desta forma: junto ao eletrodo, a concentração é a mesma do bulk da solução.
- Sobretenção pequena: $\eta = j R_{ct}$, com $R_{ct} = RT / ((\alpha_a + \alpha_c) F j_0)$.

- $j = j_0 [\exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT)]$
- j_0 : a corrente que corre em cada sentido no equilíbrio.
- Sobretenção: $\eta = E - E_{eq}$, o quanto o eletrodo sai do equilíbrio.
- Um η anódico baixa o estado $Ox + e^-$ por $F\eta$; a barreira de oxidação cai $\alpha_a F\eta$ e a de redução sobe $\alpha_c F\eta$; α_a e α_c são os coeficientes de transferência.
- Hipótese desta forma: junto ao eletrodo, a concentração é a mesma do bulk da solução.
- Sobretenção pequena: $\eta = j R_{ct}$, com $R_{ct} = RT / ((\alpha_a + \alpha_c) F j_0)$.
 - Um passo de um elétron: $\alpha_a + \alpha_c = 1$. A HER, com dois elétrons, usa 2.

Tafel: sobretensão grande

$$\eta = b \log \frac{j}{j_0}, \quad b = \frac{2,303 RT}{\alpha_a F}$$

A corrente vai de j a $10j$; j_0 , do eletrodo, não muda:

$$\begin{aligned} \eta(10j) &= b \log \frac{10j}{j_0} = b \left(\log 10 + \log \frac{j}{j_0} \right) \\ &= b \cdot 1 + b \log \frac{j}{j_0} = b + \eta(j) \end{aligned}$$

Cada fator 10 na corrente custa b de sobretensão.

A equação de Tafel e o ânodo

- $\eta = b \log(j/j_0)$

A equação de Tafel e o ânodo

- $\eta = b \log(j/j_0)$
- com $b = 2,303 RT/(\alpha_a F)$: cada fator 10 na corrente custa b de sobretensão, porque $\log(10j/j_0) = 1 + \log(j/j_0)$; j_0 , do eletrodo, não muda.

A equação de Tafel e o ânodo

- $\eta = b \log(j/j_0)$
- com $b = 2,303 RT/(\alpha_a F)$: cada fator 10 na corrente custa b de sobretensão, porque $\log(10j/j_0) = 1 + \log(j/j_0)$; j_0 , do eletrodo, não muda.
- Ânodo (OER no IrO_2): $b = 46 \text{ mV}$ por fator 10 na corrente, ajustada entre 10 e 100 mA/cm^2 ; $j_0 = 6,7 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

A equação de Tafel e o ânodo

- $\eta = b \log(j/j_0)$
- com $b = 2,303 RT/(\alpha_a F)$: cada fator 10 na corrente custa b de sobretensão, porque $\log(10j/j_0) = 1 + \log(j/j_0)$; j_0 , do eletrodo, não muda.
- Ânodo (OER no IrO_2): $b = 46 \text{ mV}$ por fator 10 na corrente, ajustada entre 10 e 100 mA/cm^2 ; $j_0 = 6,7 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.
 - α aparente de 1,52: pelo menos um elétron passa antes da etapa lenta. Um passo simples, $\alpha = 0,5$, daria 140 mV por fator 10 a 80 °C.

A equação de Tafel e o ânodo

- $\eta = b \log(j/j_0)$
- com $b = 2,303 RT/(\alpha_a F)$: cada fator 10 na corrente custa b de sobretensão, porque $\log(10j/j_0) = 1 + \log(j/j_0)$; j_0 , do eletrodo, não muda.
- Ânodo (OER no IrO_2): $b = 46 \text{ mV}$ por fator 10 na corrente, ajustada entre 10 e 100 mA/cm^2 ; $j_0 = 6,7 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.
 - α aparente de 1,52: pelo menos um elétron passa antes da etapa lenta. Um passo simples, $\alpha = 0,5$, daria 140 mV por fator 10 a 80°C .
 - Com a 2ª etapa da OER lenta e a 1ª em quase-equilíbrio, $\alpha = 1 + 0,5 = 1,5$ dá $46,7 \text{ mV}$ por fator 10. A atribuição depende da cobertura da superfície (Shinagawa et al., Sci. Rep. 5, 13801, 2015).

O cátodo, e os dois eletrodos

- Cátodo (HER no Pt): $j_0 = 52,5 \text{ A/cm}^2$ de eletrodo, 8,9 ordens de grandeza acima; regime linear, $R_{ct} = 0,29 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$.

O cátodo, e os dois eletrodos

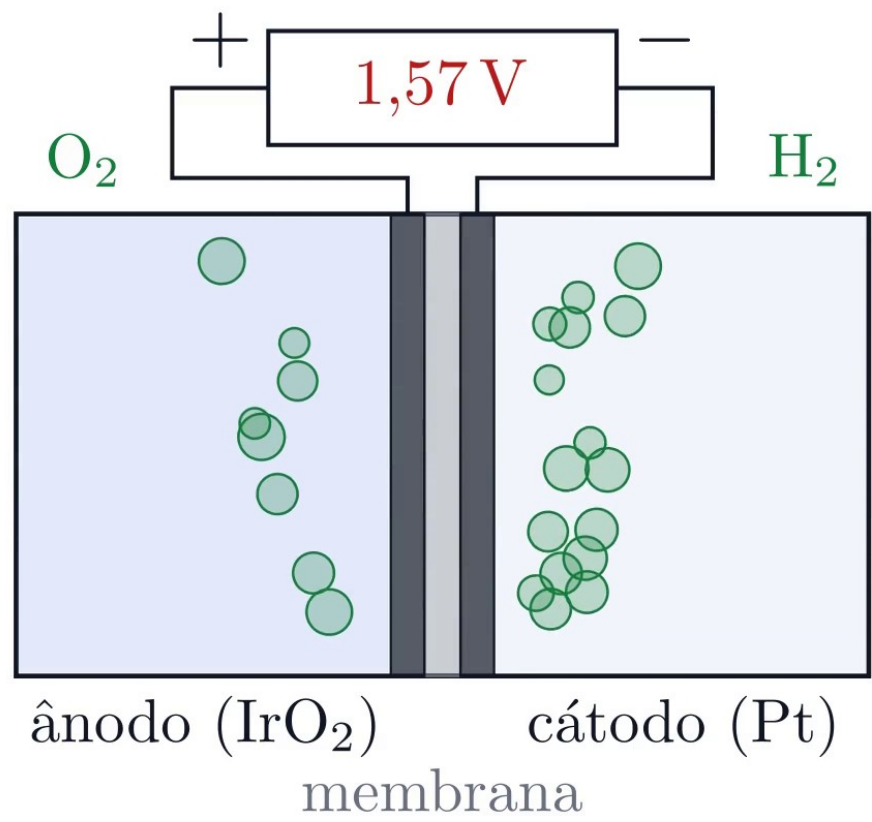
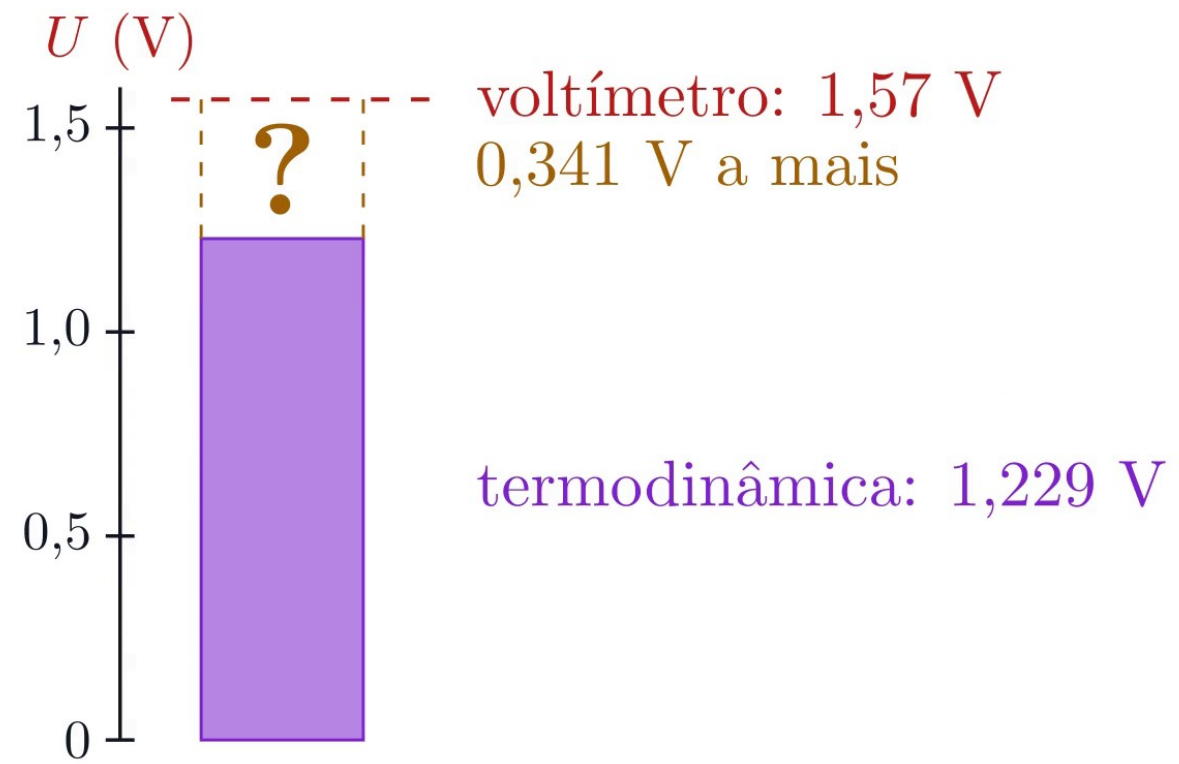
- Cátodo (HER no Pt): $j_0 = 52,5 \text{ A/cm}^2$ de eletrodo, 8,9 ordens de grandeza acima; regime linear, $R_{ct} = 0,29 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$.
 - O artigo dá $j_0 = 0,25 \text{ A por cm}^2$ de Pt; com 0,35 mg de Pt por cm^2 e $60 \text{ m}^2/\text{g}$ de área ativa, cada cm^2 de eletrodo tem 210 cm^2 de Pt: $0,25 \times 210 = 52,5 \text{ A/cm}^2$.

O cátodo, e os dois eletrodos

- Cátodo (HER no Pt): $j_0 = 52,5 \text{ A/cm}^2$ de eletrodo, 8,9 ordens de grandeza acima; regime linear, $R_{ct} = 0,29 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$.
 - O artigo dá $j_0 = 0,25 \text{ A por cm}^2$ de Pt; com $0,35 \text{ mg de Pt por cm}^2$ e $60 \text{ m}^2/\text{g}$ de área ativa, cada cm^2 de eletrodo tem 210 cm^2 de Pt: $0,25 \times 210 = 52,5 \text{ A/cm}^2$.
 - Quase toda a sobretensão da célula mora no ânodo.

O enigma resolvido

De volta ao enigma: 1,57 V a 1 A/cm²



A conta da tensão, em número

- Rota 1, a 1 A/cm^2 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sem usar o voltímetro:

A conta da tensão, em número

- Rota 1, a 1 A/cm^2 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sem usar o voltímetro:
 - Nernst: $1,168 \text{ V}$

A conta da tensão, em número

- Rota 1, a 1 A/cm^2 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sem usar o voltímetro:
 - Nernst: $1,168 \text{ V}$
 - OER, reta de Tafel estendida até 1 A/cm^2 : $0,330 \text{ V}$

A conta da tensão, em número

- Rota 1, a 1 A/cm^2 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sem usar o voltímetro:
 - Nernst: $1,168 \text{ V}$
 - OER, reta de Tafel estendida até 1 A/cm^2 : $0,330 \text{ V}$
 - ôhmica, $j \times \text{HFR}$ ($52,5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$, medida por impedância): $0,0525 \text{ V}$

A conta da tensão, em número

- Rota 1, a 1 A/cm^2 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sem usar o voltímetro:
 - Nernst: $1,168 \text{ V}$
 - OER, reta de Tafel estendida até 1 A/cm^2 : $0,330 \text{ V}$
 - ôhmica, $j \times \text{HFR}$ ($52,5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$, medida por impedância): $0,0525 \text{ V}$
 - HER, regime linear: $0,0003 \text{ V}$

A conta da tensão, em número

- Rota 1, a 1 A/cm^2 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sem usar o voltímetro:
 - Nernst: $1,168 \text{ V}$
 - OER, reta de Tafel estendida até 1 A/cm^2 : $0,330 \text{ V}$
 - ôhmica, $j \times \text{HFR}$ ($52,5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$, medida por impedância): $0,0525 \text{ V}$
 - HER, regime linear: $0,0003 \text{ V}$
- Soma: $1,551 \text{ V}$. Rota 2, o voltímetro: $1,57 \text{ V}$. Diferença: 19 mV , ou $1,2 \%$.

A conta da tensão, em número

- Rota 1, a 1 A/cm^2 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sem usar o voltímetro:
 - Nernst: $1,168 \text{ V}$
 - OER, reta de Tafel estendida até 1 A/cm^2 : $0,330 \text{ V}$
 - ôhmica, $j \times \text{HFR}$ ($52,5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$, medida por impedância): $0,0525 \text{ V}$
 - HER, regime linear: $0,0003 \text{ V}$
- Soma: $1,551 \text{ V}$. Rota 2, o voltímetro: $1,57 \text{ V}$. Diferença: 19 mV , ou $1,2 \%$.
 - Os 19 mV são transporte de prótons nos eletrodos e de gás (o artigo atribui de 5 a 20 mV): é por onde a Aula 02 começa.

- M. Bernt e H. A. Gasteiger, “Influence of Ionomer Content in $\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ Electrodes on PEM Water Electrolyzer Performance”, J. Electrochem. Soc. 163, F3179 (2016), doi:10.1149/2.0231611jes. Acesso aberto.

- M. Bernt e H. A. Gasteiger, “Influence of Ionomer Content in $\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ Electrodes on PEM Water Electrolyzer Performance”, J. Electrochem. Soc. 163, F3179 (2016), doi:10.1149/2.0231611jes. Acesso aberto.
 - O artigo decompõe a tensão da célula em perdas. Quais delas esta aula calculou, e qual ficou de fora?

- M. Bernt e H. A. Gasteiger, “Influence of Ionomer Content in $\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ Electrodes on PEM Water Electrolyzer Performance”, J. Electrochem. Soc. 163, F3179 (2016), doi:10.1149/2.0231611jes. Acesso aberto.
 - O artigo decompõe a tensão da célula em perdas. Quais delas esta aula calculou, e qual ficou de fora?
 - Por que o melhor desempenho sai com 11,6 % de ionômero no ânodo, e não com mais nem com menos?

- M. Bernt e H. A. Gasteiger, “Influence of Ionomer Content in $\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ Electrodes on PEM Water Electrolyzer Performance”, J. Electrochem. Soc. 163, F3179 (2016), doi:10.1149/2.0231611jes. Acesso aberto.
 - O artigo decompõe a tensão da célula em perdas. Quais delas esta aula calculou, e qual ficou de fora?
 - Por que o melhor desempenho sai com 11,6 % de ionômero no ânodo, e não com mais nem com menos?
 - A reta de Tafel foi ajustada entre 10 e 100 mA/cm^2 . O que se arrisca ao usá-la em 1 A/cm^2 , como fizemos?

- Notebook “Atividade em Python - Aula 01”, com os dados da Fig. 7 de Bernt e Gasteiger (2016). Atividade formativa, sem nota.

- Notebook “Atividade em Python - Aula 01”, com os dados da Fig. 7 de Bernt e Gasteiger (2016). Atividade formativa, sem nota.
 - O diagrama de Pourbaix da água, das duas retas de Nernst.

- Notebook “Atividade em Python - Aula 01”, com os dados da Fig. 7 de Bernt e Gasteiger (2016). Atividade formativa, sem nota.
 - O diagrama de Pourbaix da água, das duas retas de Nernst.
 - A tensão reversível a 80 °C e 0,53 bar: o 1,168 V do artigo.

- Notebook “Atividade em Python - Aula 01”, com os dados da Fig. 7 de Bernt e Gasteiger (2016). Atividade formativa, sem nota.
 - O diagrama de Pourbaix da água, das duas retas de Nernst.
 - A tensão reversível a 80 °C e 0,53 bar: o 1,168 V do artigo.
 - A reta de Tafel do ânodo, ajustada entre 10 e 100 mA/cm²: b , j_0 e α aparente.

- Notebook “Atividade em Python - Aula 01”, com os dados da Fig. 7 de Bernt e Gasteiger (2016). Atividade formativa, sem nota.
 - O diagrama de Pourbaix da água, das duas retas de Nernst.
 - A tensão reversível a 80 °C e 0,53 bar: o 1,168 V do artigo.
 - A reta de Tafel do ânodo, ajustada entre 10 e 100 mA/cm²: b , j_0 e α aparente.
 - A conta da tensão contra a medida, e o resíduo que cresce com a corrente.

OBRIGADO

James Moraes de Almeida
james.almeida@ilum.cnpem.br

ilum.cnpem.br