

Energia Livre

Gabriel Braun

Colégio e Curso Pensi, Coordenação de Química



Sumário

1 Energia Livre

1. Definição de energia livre:

$$G = H - TS$$

2. Energia livre e variação global de entropia.

$$\Delta G = -T\Delta S_{\text{univ}}$$

3. Energia livre e espontaneidade:

$$\Delta G < 0$$

4. Energia livre e temperatura.

5. Energia livre e estado físico.

1.1 Habilidades

- a. **Classificar** um processo quanto a sua espontaneidade a partir de sua energia livre.

2 Equilíbrio de Fase

1. Diagramas de fases.

2. Pontos de fusão, ebulição tripla.

3. Inclinação do diagrama de fases:

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

4. Propriedades críticas.

2.1 Habilidades

- a. **Identificar** os pontos triplos e o ponto crítico no diagrama de fases.
- b. **Identificar** os pontos de fusão e ebulição no diagrama de fases.
- c. **Comparar** densidades a partir do diagrama de fases.

3 Energia Livre de Reação

1. Energia livre e grau de reação.

2. Energia livre padrão de formação.

3. Energia livre a partir da entalpia e entropia de reação:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

4. Compostos estáveis e compostos lábeis.

3.1 Habilidades

- a. **Calcular** a energia livre de reação a partir da entalpia e entropia de reação.
- b. **Determinar** a espontaneidade de uma reação em uma dada temperatura.
- c. **Calcular** a temperatura mínima para que uma reação endotérmica seja espontânea.

4 Energia Livre e Trabalho não Expansivo

1. Trabalho máximo não expansivo:

$$\Delta G = -W_{e, \text{max}}$$

2. Potencial de reação:

$$\Delta G = -nF\Delta E$$

3. Potencial e temperatura:

$$\Delta E^T = \Delta E^{T_0} + (T - T_0) \left(\frac{\Delta S}{nF} \right)$$

4.1 Habilidades

- a. **Calcular** o trabalho máximo não expansivo que pode ser realizado por uma transformação.
- b. **Calcular** o potencial de uma reação em função da energia livre.
- c. **Calcular** a variação do potencial de uma reação com a temperatura.

Problemas

Nível I

2C01

Considere as proposições:

1. Uma reação química a temperatura e pressão constantes será espontânea se a variação de entropia do sistema for positiva.
2. Uma reação química a temperatura e pressão constantes será espontânea se a variação da energia livre de for negativa.
3. Em um sistema reacional em que a única forma de trabalho observável é o trabalho de expansão, a variação da entalpia é igual à quantidade de calor liberada ou absorvida pela reação, a pressão constante.

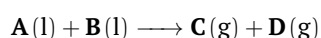
4. Para uma substância simples que admite mais de uma forma alotrópica, não há variação de entalpia na conversão de uma forma em outra.

Assinale a alternativa que relaciona as proposições *corretas*.

- ☐ 2
☐ 3
☐ 2 e 3
☐ 1, 2 e 3
☐ 2, 3 e 4

2C03

Considere a reação conduzida a pressão e temperatura constantes.



Assinale a alternativa *correta*.

- ☐ A reação será sempre espontânea, se for endotérmica.
☐ A reação será sempre espontânea, se for exotérmica.
☐ A reação será sempre espontânea, independentemente de ser exotérmica ou endotérmica.
☐ A reação nunca será espontânea, independentemente de ser exotérmica ou endotérmica.
☐ Não há como prever a espontaneidade da reação, mesmo que informações adicionais sobre o calor de reação estejam disponíveis.

2C02

Uma reação química ocorre a pressão e temperatura constantes apresentando pequena variação de energia livre, de valor próximo de zero, variação positiva de entropia e negativa de entalpia.

Assinale a alternativa *correta*.

- ☐ A reação é espontânea, a temperatura é próxima de $\Delta H/\Delta G$ e ela nunca atinge o equilíbrio.
☐ A reação não é espontânea, a temperatura é próxima de $\Delta H/\Delta S$ e não há variação na composição do meio reacional.
☐ A reação não é espontânea, a temperatura é próxima de $\Delta G/\Delta H$ e há uma pequena variação na composição do meio reacional.
☐ A reação é espontânea, a temperatura é próxima de $\Delta H/\Delta S$ e há variação na composição do meio reacional.
☐ A reação é espontânea, a temperatura é próxima de $\Delta G/\Delta H$ e o equilíbrio é atingido.

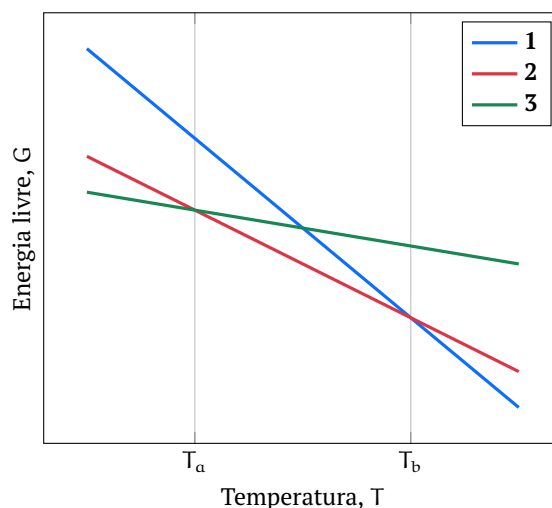


FIGURA 1 Energia livre e estado físico.

2C07

Assinale a alternativa correta a respeito de uma substância que funde a 1700 K sob 1 atm e a 1600 K sob 100 atm.

- ☐ A fase líquida é mais densa que a fase sólida.
☐ A fase líquida é menos densa que a fase sólida.
☐ A fase líquida possui a mesma densidade que a fase sólida.
☐ A fase líquida é mais densa que a fase sólida sob pressões abaixo de 1 atm.
☐ A fase líquida é mais densa que a fase sólida sob pressões acima de 100 atm.

2C04

Considere a variação da energia livre molar de uma substância pura com a temperatura em seus estados sólido, líquido e gasoso.

- As três retas são decrescentes, pois a expressão $G = H - TS$ é representada por uma reta com inclinação $-S$.
- As retas 1, 2 e 3 representam as fases sólida, líquida e gasosa, respectivamente.
- A temperatura T_a indica o ponto de fusão da substância.
- Em temperaturas mais altas do que T_b , a fase 1 é a mais estável.

Assinale a alternativa que relaciona as proposições *corretas*.

- ☐ 1 e 3
☐ 1 e 4
☐ 3 e 4
☐ 1, 3 e 4
☐ 1, 2, 3 e 4

2C09

Assinale a alternativa que mais se aproxima da energia livre de fusão da água a 10 °C e 1 atm.

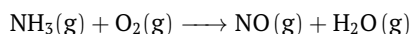
- ☐ -440 J mol⁻¹
- ☐ -220 J mol⁻¹
- ☐ -110 J mol⁻¹
- ☐ 110 J mol⁻¹
- ☐ 220 J mol⁻¹

Dados

- $\Delta H_{\text{fus}}(\text{H}_2\text{O}) = 6 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta S_{\text{fus}}(\text{H}_2\text{O}) = 22 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C10

Considere a reação de síntese do óxido nítrico:



Assinale a alternativa que mais se aproxima da energia livre de síntese de 120 g de óxido nítrico a 25 °C e 1 atm.

- ☐ -320 kJ
- ☐ -510 kJ
- ☐ -630 kJ
- ☐ -780 kJ
- ☐ -960 kJ

Dados

- $\Delta G_f^\circ(\text{NH}_3, \text{g}) = -16,4 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta G_f^\circ(\text{H}_2\text{O}, \text{g}) = -229 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta G_f^\circ(\text{NO}, \text{g}) = 86,6 \text{ kJ mol}^{-1}$

2C11

Assinale a alternativa que mais se aproxima da energia livre de formação do HI a 25 °C e 1 atm.

- ☐ -1,7 kJ mol⁻¹
- ☐ -1,5 kJ mol⁻¹
- ☐ -1,3 kJ mol⁻¹
- ☐ 1,5 kJ mol⁻¹
- ☐ 1,7 kJ mol⁻¹

Dados

- $\Delta H_f^\circ(\text{HI}, \text{g}) = -26,5 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{H}_2, \text{g}) = 131 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{I}_2, \text{s}) = 116 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{HI}, \text{g}) = 207 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C12

Assinale a alternativa que mais se aproxima da temperatura na qual a redução do óxido de ferro com carbono formando ferro metálico e CO₂ é espontânea.

- ☐ 105 K
- ☐ 210 K
- ☐ 420 K
- ☐ 630 K
- ☐ 840 K

Dados

- $\Delta H_f^\circ(\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{s}) = -824 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2, \text{g}) = -394 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{C, grafita}) = 5,74 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{s}) = 87,4 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{CO}_2, \text{g}) = 214 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{Fe, s}) = 27,3 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C13

Assinale a alternativa que mais se aproxima da temperatura na qual a formação do óxido de cálcio pela decomposição do carbonato de cálcio é espontânea.

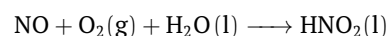
- ☐ 1110 K
- ☐ 2210 K
- ☐ 3310 K
- ☐ 4410 K
- ☐ 5510 K

Dados

- $\Delta H_f^\circ(\text{CaCO}_3, \text{s}) = -1210 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2, \text{g}) = -394 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta H_f^\circ(\text{CaO}, \text{s}) = -635 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{CaCO}_3, \text{s}) = 92,9 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{CO}_2, \text{g}) = 214 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{CaO}, \text{s}) = 39,8 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C16

O potencial da reação de síntese do ácido nitroso é de 0,24 V em condições padrão.



Assinale a alternativa que apresenta o valor da energia livre de síntese de um mol de ácido nitroso.

- ☐ $-11,6 \text{ kJ mol}^{-1}$
- ☐ $-23,2 \text{ kJ mol}^{-1}$
- ☐ $-34,8 \text{ kJ mol}^{-1}$
- ☐ $-46,3 \text{ kJ mol}^{-1}$
- ☐ $-69,5 \text{ kJ mol}^{-1}$

2C17

Um carro elétrico com motor de 310 kW possui 95% de eficiência e utiliza aproximadamente 15% de sua potência máxima. A eficiência da célula de hidrogênio que produz energia elétrica é de 75%

Assinale a alternativa que mais se aproxima da massa necessária de hidrogênio para viajar do Rio de Janeiro a São José dos Campos (330 km) a 100 km h^{-1} .

- ☐ 1 kg
- ☐ 3 kg
- ☐ 5 kg
- ☐ 7 kg
- ☐ 9 kg

Dados

- $\Delta G_f^\circ (\text{H}_2\text{O}, \text{l}) = -237 \text{ kJ mol}^{-1}$

2C25

Assinale a alternativa que mais se aproxima da quantidade de glicose que um pássaro de 30 g deve consumir para voar a uma altura de 10 m.

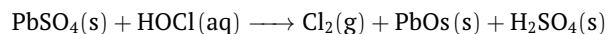
- ☐ $1,9 \times 10^{-5} \text{ g}$
- ☐ $1,9 \times 10^{-4} \text{ g}$
- ☐ $1,9 \times 10^{-3} \text{ g}$
- ☐ $1,9 \times 10^{-2} \text{ g}$
- ☐ $1,9 \times 10^{-1} \text{ g}$

Dados

- $\Delta H_c^\circ (\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6, \text{s}) = -2810 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{H}_2\text{O}, \text{l}) = 69,9 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{CO}_2, \text{g}) = 214 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6, \text{s}) = 212 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{O}_2, \text{g}) = 205 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C15

A reação entre sulfato de chumbo e ácido clorídrico tem potencial 0,02 V e absorve 19,9 kJ de energia por mol de sulfato de chumbo a 298 K.



Assinale a alternativa que apresenta o valor da entropia de reação de um mol de sulfato de chumbo.

- ☐ $20 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ $40 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ $60 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ $80 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ $100 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

Nível II

2C06

O ponto triplo da água ocorre a $0,01^\circ \text{C}$ e 610 Pa e o ponto crítico a 647 K e 218 atm.

- a. **Esboce** o diagrama de fases da água pura indicando o ponto triplo, ponto crítico e os pontos de fusão e ebulição a 1 atm.
- b. **Esboce** o diagrama de fases de uma substância que sublima à pressão ambiente, cuja temperatura crítica seja 216,6 K, e cuja fase sólida é mais densa do que a fase líquida.

2C27

Considere as proposições:

1. A energia livre de congelamento da água é negativa a 27°C e 1 atm.
2. A transição de fase do enxofre ortorrômbico para monoclinico é espontânea para temperaturas acima de 95°C , assim, a entalpia e a entropia do enxofre monoclinico são maiores que as do enxofre ortorrômbico
3. A mistura de duas amostras de gás sempre apresenta variação de energia livre negativa.
4. A complexação em fase aquosa do cátion níquel (II) com amônia formando $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ é mais espontânea complexação que a com $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$ (en) formando $[\text{Ni}(\text{en})_3]^{2+}$.

Assinale a alternativa que relaciona as proposições corretas.

- ☐ 2
- ☐ 3
- ☐ 2 e 3
- ☐ 1, 2 e 3
- ☐ 2, 3 e 4

2C28

Um elástico é tensionado rapidamente e posto em contato com um termômetro, que indica um aumento de temperatura. Quando o mesmo elástico permanece por um tempo esticado e é rapidamente relaxado, o termômetro indica uma diminuição na temperatura.

- Compare** a entalpia do elástico tensionado e relaxado.
- Compare** a entropia do elástico tensionado e relaxado.

2C14

O oxigênio e o hidrogênio combinam-se, em células de combustível, produzindo água líquida e gerando corrente elétrica. O trabalho elétrico máximo que essas células podem produzir é 237 kJ por mol de hidrogênio.

Determine o ponto de ebulição da água.

Dados

- $\Delta H_f^\circ (\text{H}_2\text{O}, \text{g}) = -242 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{H}_2\text{O}, \text{l}) = 69,9 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{H}_2, \text{g}) = 131 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{O}_2, \text{g}) = 205 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ (\text{H}_2\text{O}, \text{g}) = 189 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C26

Em uma célula de um organismo, a energia necessária para a síntese da ureia a partir de amônia e dióxido de carbono é obtida por oxidação da glicose.

Assinale a alternativa que mais se aproxima da quantidade de ureia formada pela oxidação de $60 \text{ nmol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ de glicose.

- ☐ 35 $\text{nmol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$
- ☐ 105 $\text{nmol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$
- ☐ 315 $\text{nmol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$
- ☐ 630 $\text{nmol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$
- ☐ 945 $\text{nmol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$

Dados

- $\Delta G_f^\circ (\text{NH}_3, \text{g}) = -16,4 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta G_f^\circ (\text{CO}, \text{s}) = -197 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta G_f^\circ (\text{H}_2\text{O}, \text{l}) = -237 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta G_f^\circ (\text{CO}_2, \text{g}) = -394 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta G_f^\circ (\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6, \text{s}) = -910 \text{ kJ mol}^{-1}$

2C18

Assinale a alternativa *correta*.

- ☐ Grafite e diamante são exemplos de carbono puro, mas não são formas alotrópicas de um mesmo elemento.
- ☐ Sob altas pressões, o diamante é menos estável que o grafite.
- ☐ Diamante pode se transformar, de forma espontânea, em grafite.
- ☐ A conversão do grafite em diamante é exotérmica.
- ☐ Altas pressões favorecem a formação de grafite.

Dados

- $\rho (\text{C}, \text{diamante}) = 4,0 \text{ g cm}^{-3}$
- $\rho (\text{C}, \text{grafite}) = 2,5 \text{ g cm}^{-3}$
- $\Delta H_f^\circ (\text{C}, \text{diamante}) = 1,9 \text{ kJ mol}^{-1}$

2C19

Assinale a alternativa que mais se aproxima do trabalho realizado para a conversão de 1 mol de estanho cinza em estanho branco a 298 K e 10 bar.

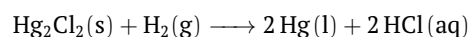
- ☐ -4,4 J
- ☐ 0
- ☐ 4,4 J
- ☐ 2,2 J
- ☐ -3,3 J

Dados

- $\rho (\text{Sn}, \text{branco}) = 7,31 \text{ g cm}^{-3}$
- $\rho (\text{Sn}, \text{cinza}) = 5,75 \text{ g cm}^{-3}$

2C23

Considere uma célula eletroquímica na qual ocorre a reação:



O potencial padrão para essa célula é 0,268 V a 294 K e 0,264 V a 302 K.

Assinale a alternativa que mais se aproxima da variação de entropia para essa reação.

- ☐ -2,60 $\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ -48,20 $\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ -12,90 $\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ -96,50 $\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- ☐ -87,90 $\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C24

Uma pequena célula eletroquímica blindada, formada por eletrodos de alumínio e de níquel, deve operar a temperatura constante de 298 K. Para tanto, recebe uma camisa de refrigeração, isolada do meio externo, contendo 100 g de água. A célula apresenta variação de potencial na razão de $1,5 \times 10^{-4} \text{ V K}^{-1}$.

Determine a elevação da temperatura que ocorrerá na água dentro da camisa de refrigeração quando a célula transfere ao exterior, de maneira reversível, uma carga de 1 F.

Dados

- $C_p(\text{H}_2\text{O}, \text{l}) = 75,3 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

Nível III

2C22

Uma amostra de 1 kg de carbonato de cálcio a 298 K é introduzido em um forno que opera a 101 kPa. O forno é então aquecido até a temperatura T em que ocorrerá a calcinação do carbonato de cálcio. O valor absoluto da variação da energia livre da reação de calcinação à temperatura T é $10,7 \text{ kJ mol}^{-1}$. Considere a variação da entalpia e entropia com a temperatura.

- Determine** a temperatura de calcinação T.
- Determine** a quantidade de calor necessária para a calcinação completa do carbonato.

Dados

- $C_p(\text{CaCO}_3, \text{s}) = 81,9 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $C_p(\text{CO}_2, \text{g}) = 37,1 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $C_p(\text{CaO}, \text{s}) = 42,8 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta H_f^\circ(\text{CaCO}_3, \text{s}) = -1210 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2, \text{g}) = -394 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta H_f^\circ(\text{CaO}, \text{s}) = -635 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{CaCO}_3, \text{s}) = 92,9 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{CO}_2, \text{g}) = 214 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $\Delta S^\circ(\text{CaO}, \text{s}) = 39,8 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

2C21

Assinale a alternativa que mais se aproxima da pressão necessária para a conversão de grafite em diamante a 300 K. A variação da energia interna com a pressão é desprezível.

- ☐ $1,3 \times 10^3 \text{ bar}$
- ☐ $1,3 \times 10^4 \text{ bar}$
- ☐ $1,3 \times 10^5 \text{ bar}$
- ☐ $1,3 \times 10^6 \text{ bar}$
- ☐ $1,3 \times 10^7 \text{ bar}$

Dados

- $\rho(\text{C}, \text{diamante}) = 4,0 \text{ g cm}^{-3}$
- $\rho(\text{C}, \text{grafite}) = 2,5 \text{ g cm}^{-3}$
- $\Delta G_f^\circ(\text{C}, \text{diamante}) = 2,9 \text{ kJ mol}^{-1}$

2C20

Determine a temperatura em que o fundo de uma coluna 100 m de mercúrio líquido começa a congelar. A variação da energia interna com a pressão é desprezível.

Dados

- $\rho(\text{Hg}, \text{l}) = 13,6 \text{ g cm}^{-3}$
- $\rho(\text{Hg}, \text{s}) = 14,2 \text{ g cm}^{-3}$
- $\Delta H_{\text{fus}}^\circ(\text{Hg}) = 2,29 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $T_{\text{fus}}(\text{Hg}) = -38,8^\circ \text{C}$

Gabarito**Nível I**

- | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1. <input type="checkbox"/> | 2. <input type="checkbox"/> | 3. <input type="checkbox"/> | 4. <input type="checkbox"/> | 5. <input type="checkbox"/> |
| 6. <input type="checkbox"/> | 7. <input type="checkbox"/> | 8. <input type="checkbox"/> | 9. <input type="checkbox"/> | 10. <input type="checkbox"/> |
| 11. <input type="checkbox"/> | 12. <input type="checkbox"/> | 13. <input type="checkbox"/> | 14. <input type="checkbox"/> | |

Nível II

- Esboço
 - Esboço
- ☐
- A entalpia do elástico tensionado é maior.
 - A entropia do elástico tensionado é menor.
- $95,6^\circ \text{C}$
- ☐
- ☐
- ☐
- ☐
- $10,3 \text{ K}$

Nível III

- 1190 K
 - 2750 kJ
- ☐
- 235 K