

**3<sup>a</sup>**

Série

Física

**MATERIAL  
DIGITAL**

# Ciclos termodinâmicos

## Conteúdos

- Termodinâmica

## Objetivos

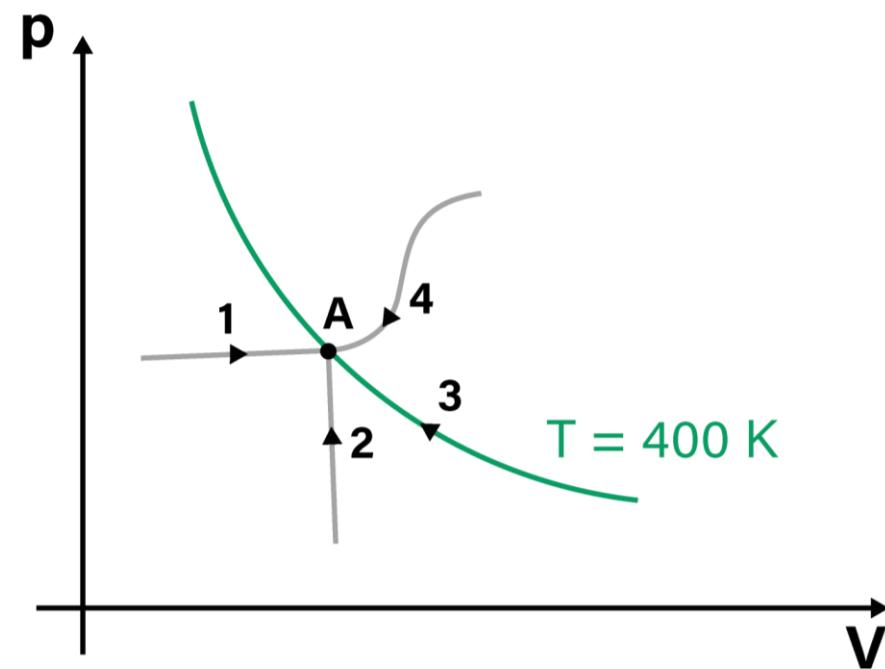
- Analisar as características de um ciclo termodinâmico, evidenciando as principais grandezas físicas envolvidas.

## Energia interna de um gás ideal

Considere dois mols de um gás ideal monoatômico, em um estado termodinâmico A, com uma temperatura de 400 K, conforme representado no gráfico ao lado. Calcule o valor da energia interna dessa amostra gasosa.

3 minutos

VIREM E CONVERSEM



Elaborado especialmente para a aula.

Gráfico  $P\text{-}V$  de um gás perfeito monoatômico, mostrando uma curva com temperatura absoluta de 400 K, na qual está localizado o ponto A. O gráfico também ilustra quatro caminhos diferentes para o gás atingir esse ponto (estado do gás).

## Energia interna de um gás ideal

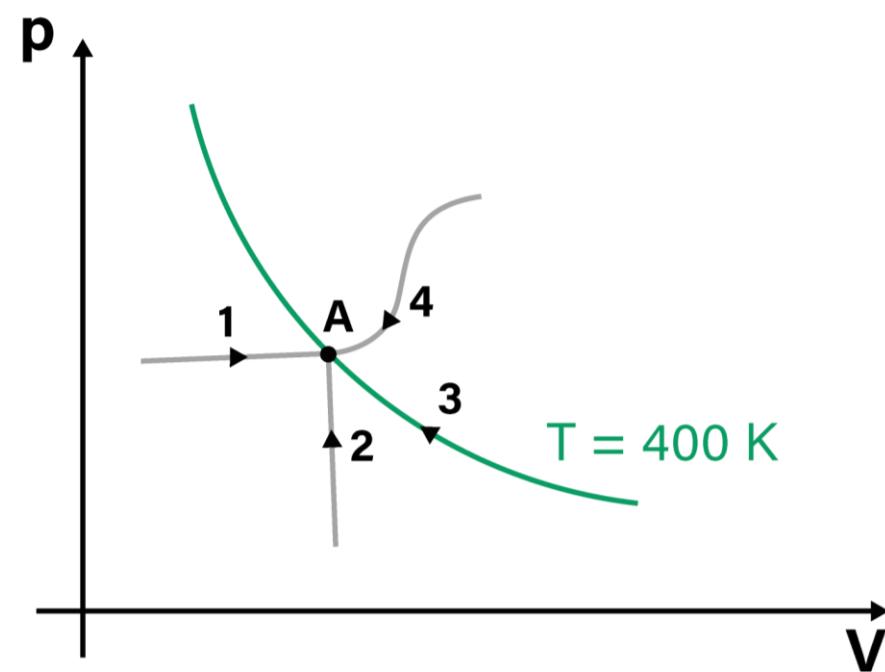
O valor da energia interna dessa amostra gasosa será calculado por:

$$U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T$$

$$U = \frac{3}{2} \cdot 2 \text{ mols} \cdot 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 400\text{K}$$

$$U \cong 9.970 \text{ J}$$

3 minutos

**VIREM E CONVERSEM**


Elaborado especialmente para a aula.

Gráfico  $P\text{-}V$  de um gás perfeito monoatômico, mostrando uma curva com temperatura absoluta de  $400 \text{ K}$ , na qual está localizado o ponto  $A$ . O gráfico também ilustra quatro caminhos diferentes para o gás atingir esse ponto (estado do gás).

## Função de estado e funções caminho

O cálculo anterior mostra que a energia interna do gás na situação é de aproximadamente 9970 J. No diagrama p-V ao lado, observe que o gás pode atingir o ponto A por meio de diferentes transformações, indicadas pelos números 1, 2, 3 e 4.

No entanto, independentemente da transformação ocorrida, o valor de sua energia interna em A não muda.

Por isso, dizemos que a **energia interna** é uma **função de estado**.

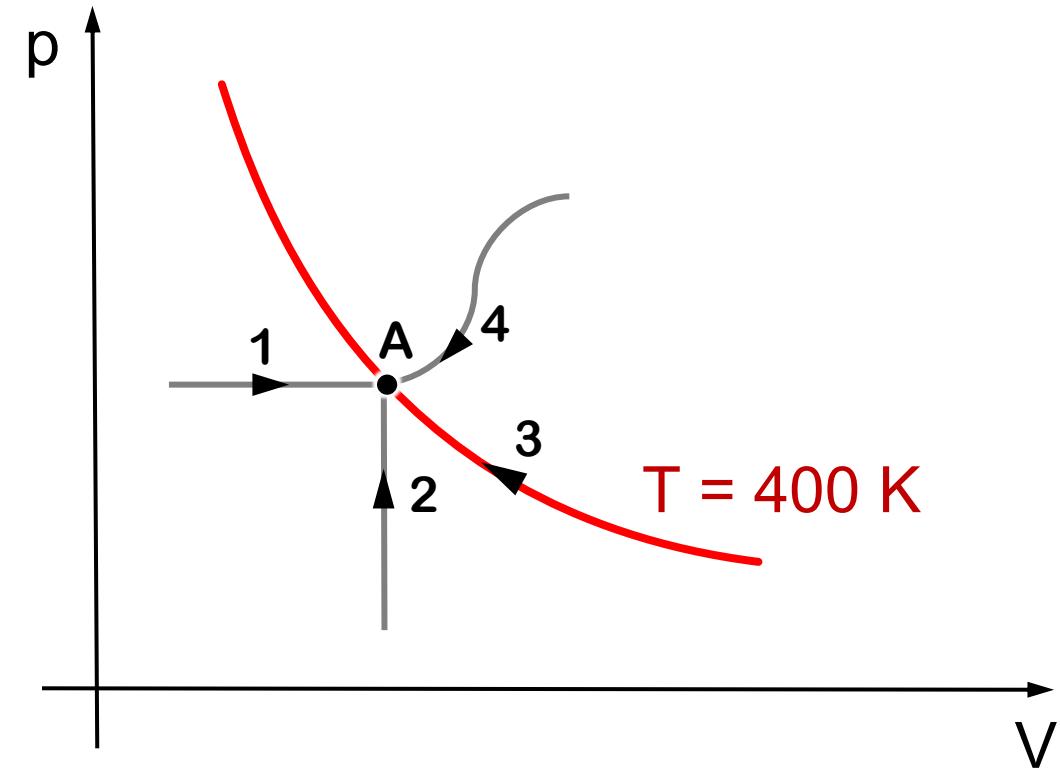


Gráfico p-V de um gás perfeito monoatômico, mostrando a curva isotérmica com temperatura absoluta de 400 K, na qual está localizado o ponto A. O gráfico também ilustra quatro caminhos diferentes para o gás atingir esse ponto (estado do gás).

## Energia interna de um gás ideal

Como acabamos de ver, a energia interna do gás é uma função de estado, pois não depende dos caminhos percorridos pelo gás para ir do estado A para o B.

Assim, concluímos que a variação da energia interna ( $\Delta U$ ) do gás em qualquer transformação genérica de A para B também não depende do caminho do gás.

Essa variação de energia interna depende apenas das temperaturas  $T_A$  e  $T_B$  e do número de mols.

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T$$

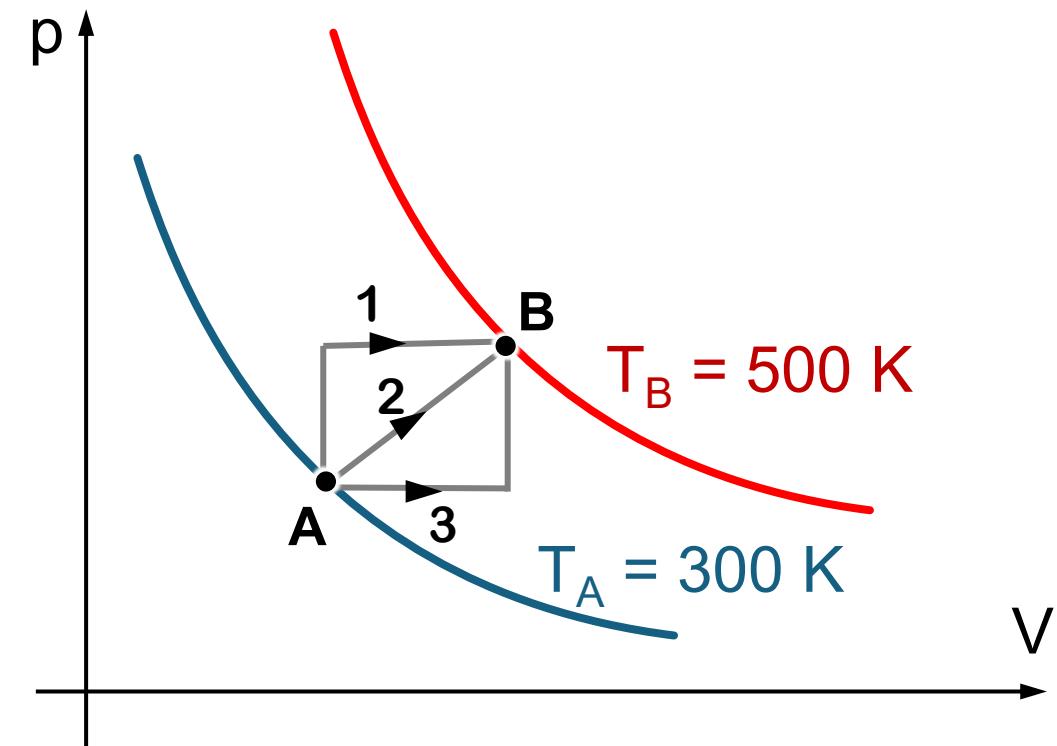


Gráfico p-V de um gás perfeito monoatômico, mostrando duas curvas isotérmicas com temperaturas de, respectivamente, 300 K e 500 K. O gráfico também ilustra três caminhos diferentes para o gás evoluir do ponto A para o B (estados A e B).

## Variação da energia interna em um ciclo termodinâmico

Em um ciclo termodinâmico genérico, um gás parte do estado inicial, evolui, por meio de uma sequência de estados, e retorna ao seu estado inicial.

Para determinarmos a variação da energia interna nesse ciclo, faremos:

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CD} + \Delta U_{DA}$$

Abrindo cada um dos termos de variação:

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = (U_B - U_A) + (U_C - U_B) + (U_D - U_C) + (U_A - U_D)$$

Logo,

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = 0$$

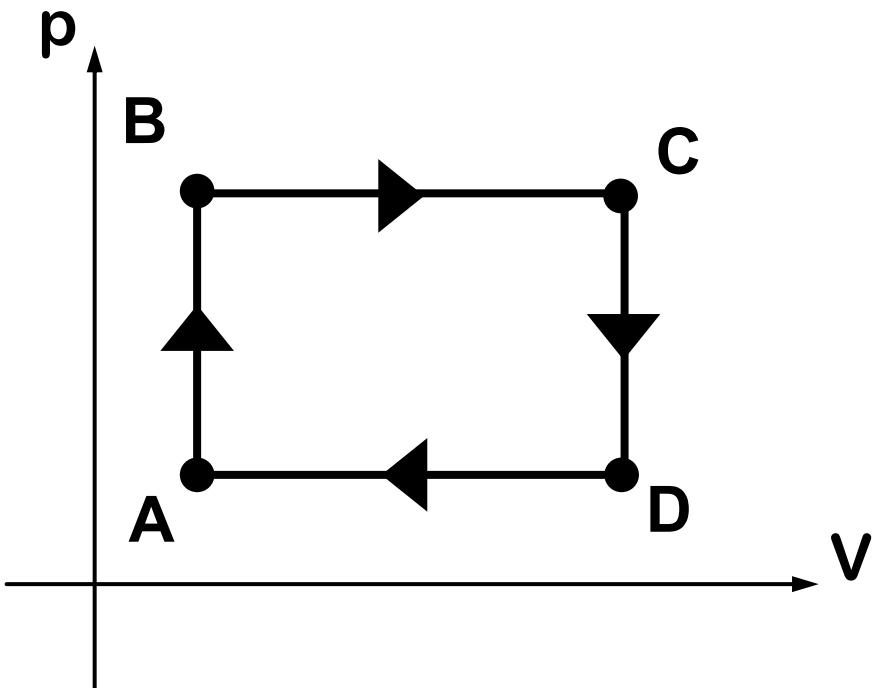


Gráfico p-V de um gás perfeito monoatômico, no qual o gás parte do ponto A (estado A) e evolui para BCD, retornando ao seu estado inicial.

## Variação da energia interna em um ciclo termodinâmico

O resultado obtido está fisicamente relacionado ao fato de que, em uma transformação cíclica, o estado inicial é o mesmo que o estado final do gás.

A energia interna ( $U$ ) é uma função de estado, o que significa que, em qualquer ciclo termodinâmico, as energias internas no início e no final são iguais.

$$U_{\text{inicial}} = U_{\text{final}}$$

Assim,

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = U_{\text{final}} - U_{\text{inicial}} = 0$$

**FICA A DICA**

Em todo ciclo termodinâmico, a variação da energia interna é nula ( $\Delta U_{\text{ciclo}} = 0$ ).

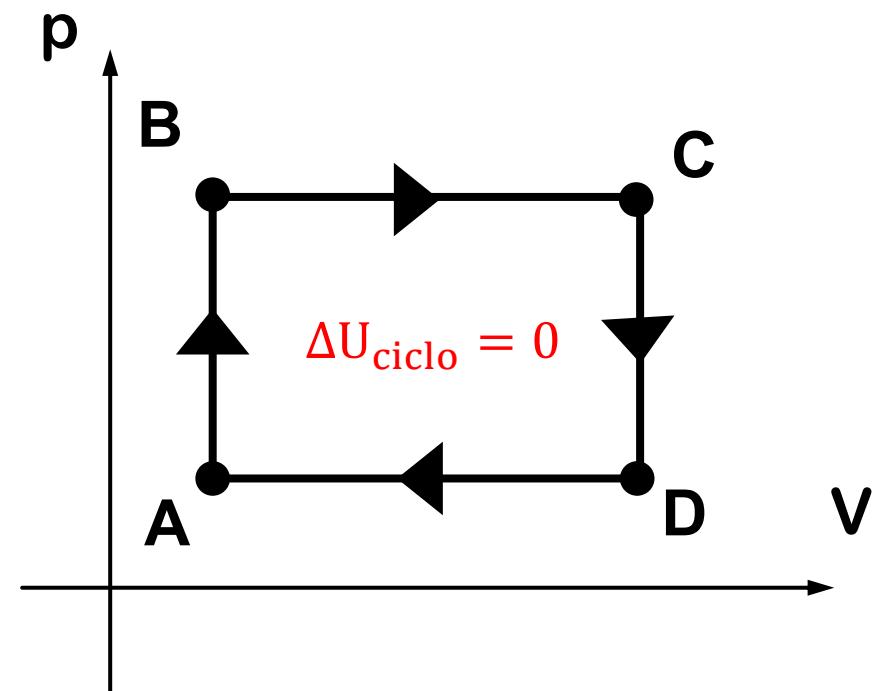


Gráfico p-V de um gás perfeito monoatômico, no qual o gás parte do ponto A (estado A) e evolui para BCD, retornando ao seu estado inicial.



**Pause e responda**

## Variação da energia interna em um ciclo termodinâmico

Em um ciclo termodinâmico completo, uma substância realiza uma sequência de transformações, retornando ao seu estado inicial. Qual é a variação total da energia interna da substância ao final do ciclo?

**A variação é positiva, pois o sistema realiza trabalho.**

**A variação é negativa, pois o sistema perde calor.**

**A variação é zero, pois o sistema retorna ao estado inicial.**

**A variação depende das temperaturas inicial e final.**

**Continua**





Pause e responda

## Correção

### Variação da energia interna em um ciclo termodinâmico

Em um ciclo termodinâmico completo, uma substância realiza uma sequência de transformações, retornando ao seu estado inicial. Qual é a variação total da energia interna da substância ao final do ciclo?



A variação é positiva, pois o sistema realiza trabalho.

A variação é negativa, pois o sistema perde calor.



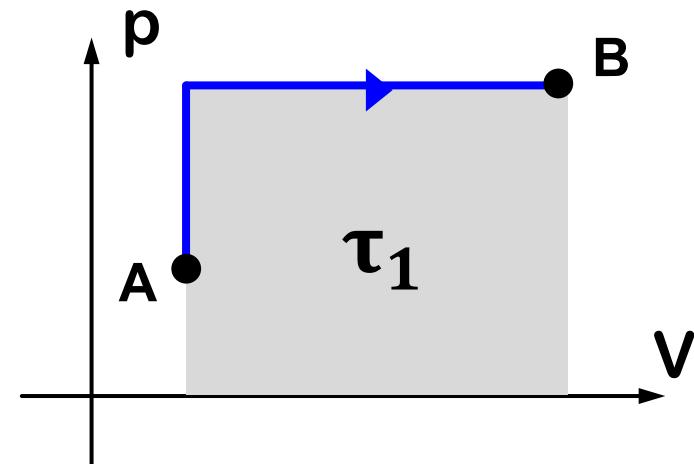
A variação é zero, pois o sistema retorna ao estado inicial.

A variação depende das temperaturas inicial e final.

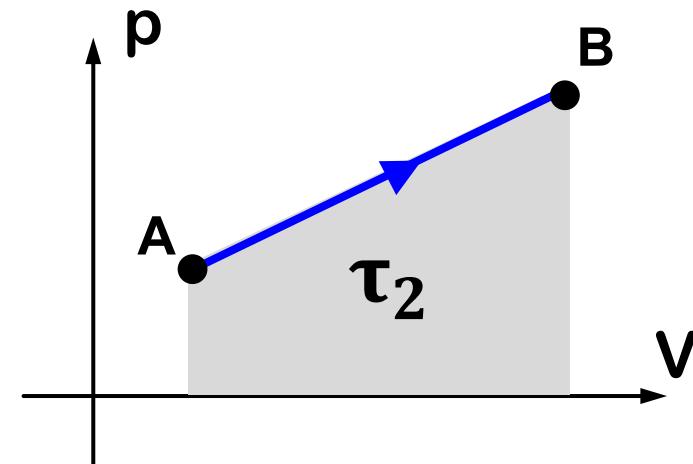


## Função de estado e funções caminho

Considere um gás ideal que evolua do estado A para o estado B. Suponha que ele possa seguir dois caminhos: o caminho 1, ilustrado no gráfico p-V à esquerda; e o caminho 2, mostrado no gráfico à direita. Como o trabalho realizado pelo gás ou sobre ele é numericamente igual à área sob a curva do gráfico, teremos um trabalho diferente para cada percurso.



Produzido pela SEDUC-SP.



**Destaque**



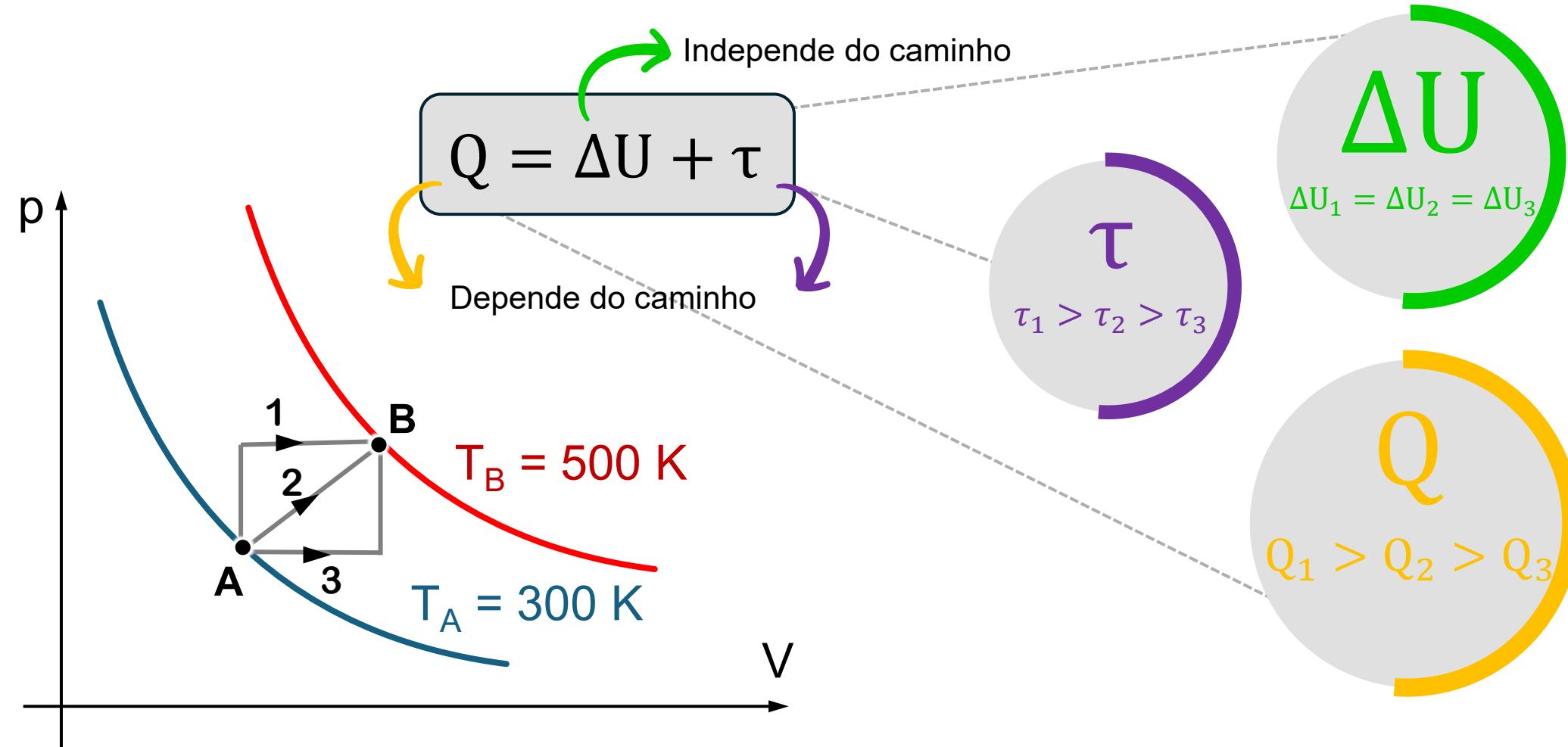
O trabalho é uma função caminho, pois depende do caminho seguido pelo gás ao evoluir de A para B.





## Dependência de caminhos na 1<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica

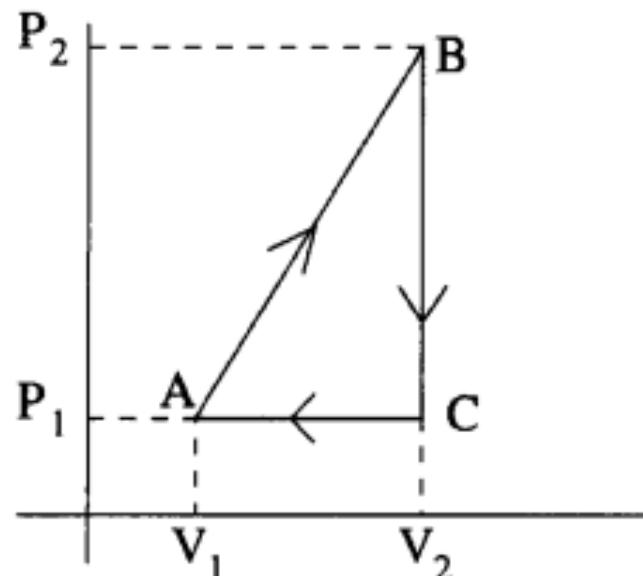
Observem o resumo a seguir sobre as dependências de caminhos na 1<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica.



**(UDESC 2018 Adaptada)** A Figura a seguir ilustra o processo termodinâmico ABCA realizado por um gás. Sabe-se que  $V_1 = 2,0\text{ L}$  e  $V_2 = 3V_1$ . Além disso,  $P_1 = 2000\text{ Pa}$  e  $P_2 = 4P_1$ . Assinale a alternativa que representa o trabalho realizado pelo gás, neste ciclo.

- A  20 J
- B  12 J
- C  8 J
- D  40 J
- E  24 J

**TODO MUNDO ESCREVE**



## Correção

- A 20 J ✗
- B 12 J ✓
- C 8 J ✗
- D 40 J ✗
- E 24 J ✗

O trabalho do ciclo pode ser calculado por meio da área delimitada pela curva. Portanto, o trabalho deste ciclo pode ser calculado por:

$$\tau_{ABC} = \text{área do triângulo } ABC$$

$$\tau_{ABC} = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{(V_2 - V_1) \cdot (P_2 - P_1)}{2}$$

Substituindo os valores dados no enunciado:

$$\tau_{ABC} = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{(3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}) \cdot (4 \cdot 2000 - 2000)}{2}$$

$$\tau_{ABC} = \frac{(4 \cdot 10^{-3}) \cdot (6 \cdot 10^3)}{2} = \frac{24}{2}$$

Logo,

$$\tau_{ABC} = 12 \text{ J}$$



## Trabalho realizado em um ciclo

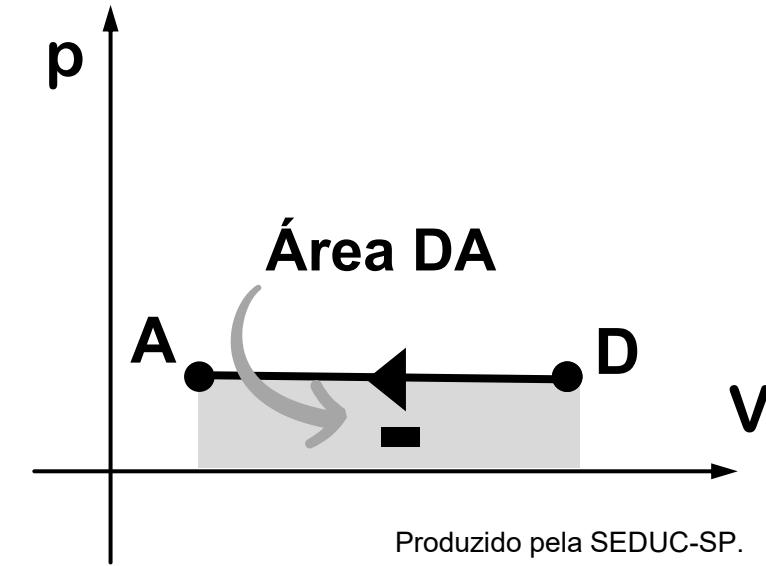
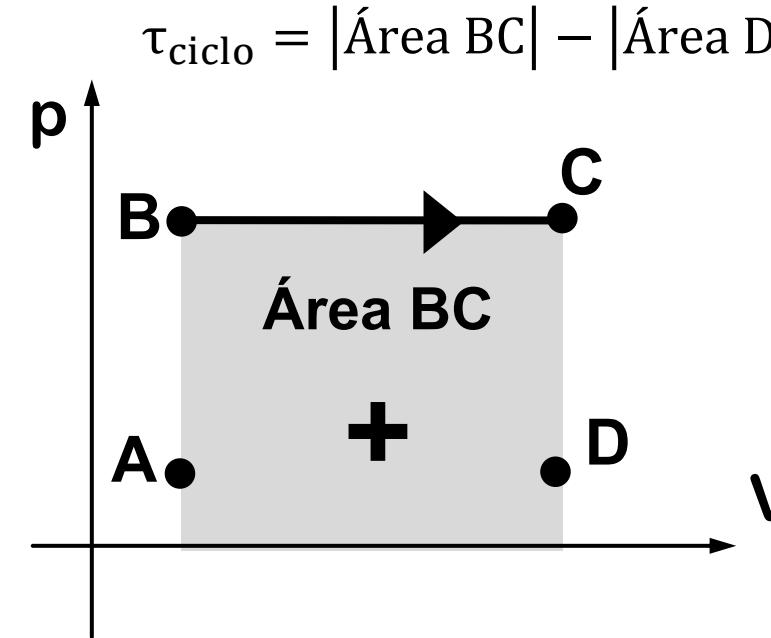
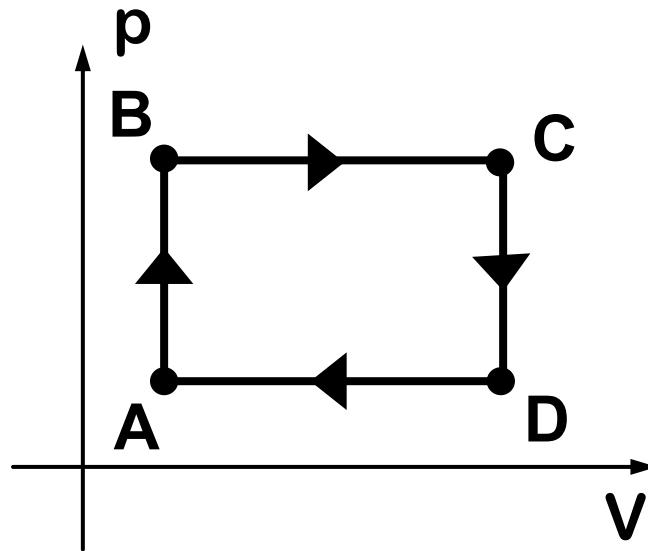
Para calcular o trabalho realizado em um ciclo termodinâmico, podemos calcular a área delimitada pela curva, como fizemos para processos abertos e isolados anteriormente. Vamos analisar o trabalho do ciclo ABCDA como exemplo:

$$\tau_{\text{ciclo}} = \tau_{AB} + \tau_{BC} + \tau_{CD} + \tau_{DA}$$

Entretanto, não há variação de volume nos processos AB e CD, assim:

$$\tau_{AB} = \tau_{CD} = 0$$

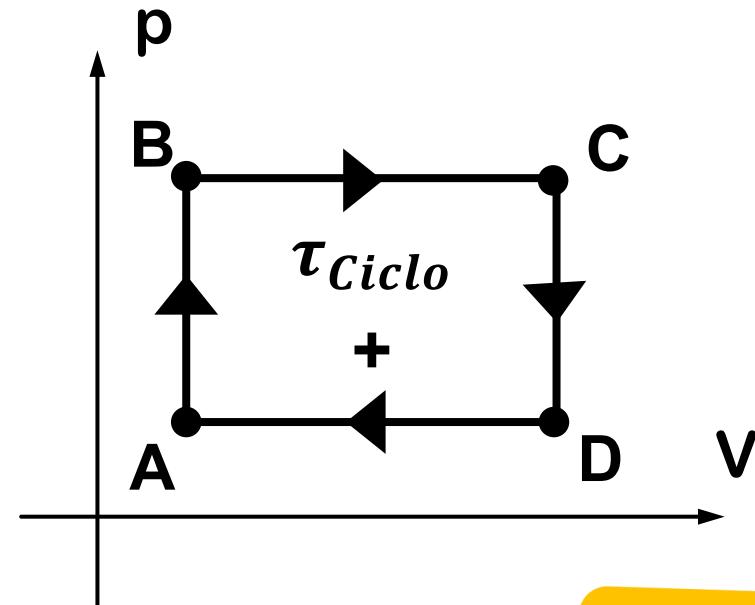
Logo,





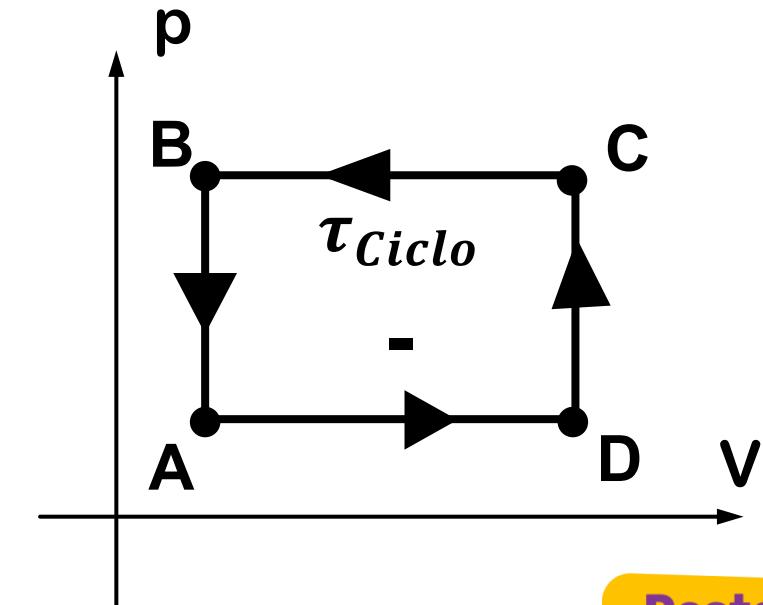
## Trabalho realizado em um ciclo

A depender do sentido do ciclo, o trabalho total realizado na sequência de processos será positivo ou negativo.



**Destaque**

$\tau_{ciclo} > 0 \Leftrightarrow$  se o ciclo for percorrido no sentido **horário**.

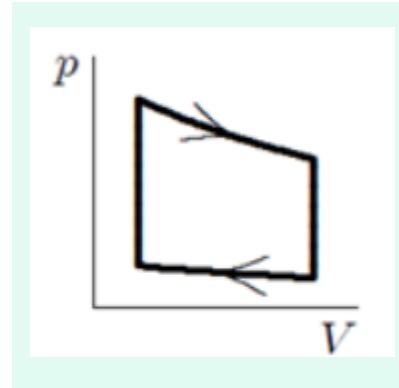


**Destaque**

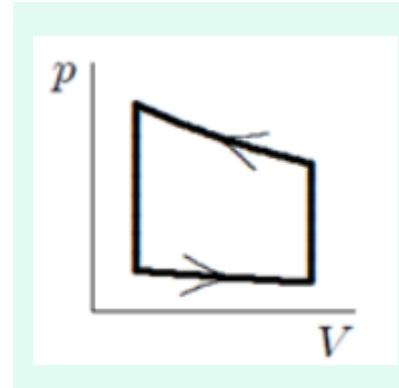
$\tau_{ciclo} < 0 \Leftrightarrow$  se o ciclo for percorrido no sentido **anti-horário**.

**(UDESC 2017 – Adaptada)** As figuras a seguir mostram cinco gráficos da pressão em função do volume para um certo gás submetido a cinco processos cíclicos diferentes. Assinale a alternativa que representa o ciclo termodinâmico no qual o gás realiza a maior quantidade de trabalho possível.

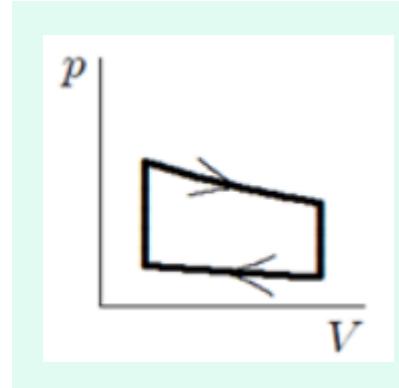
A



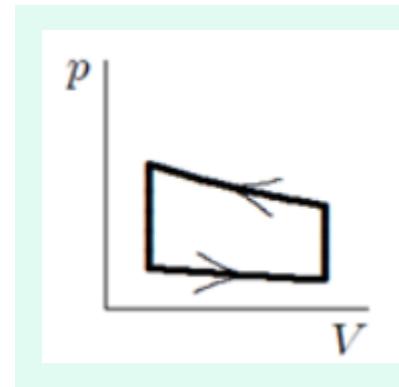
B



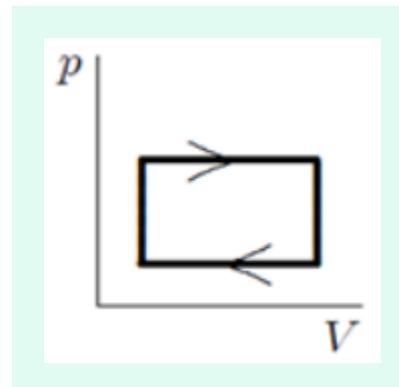
C



D



E

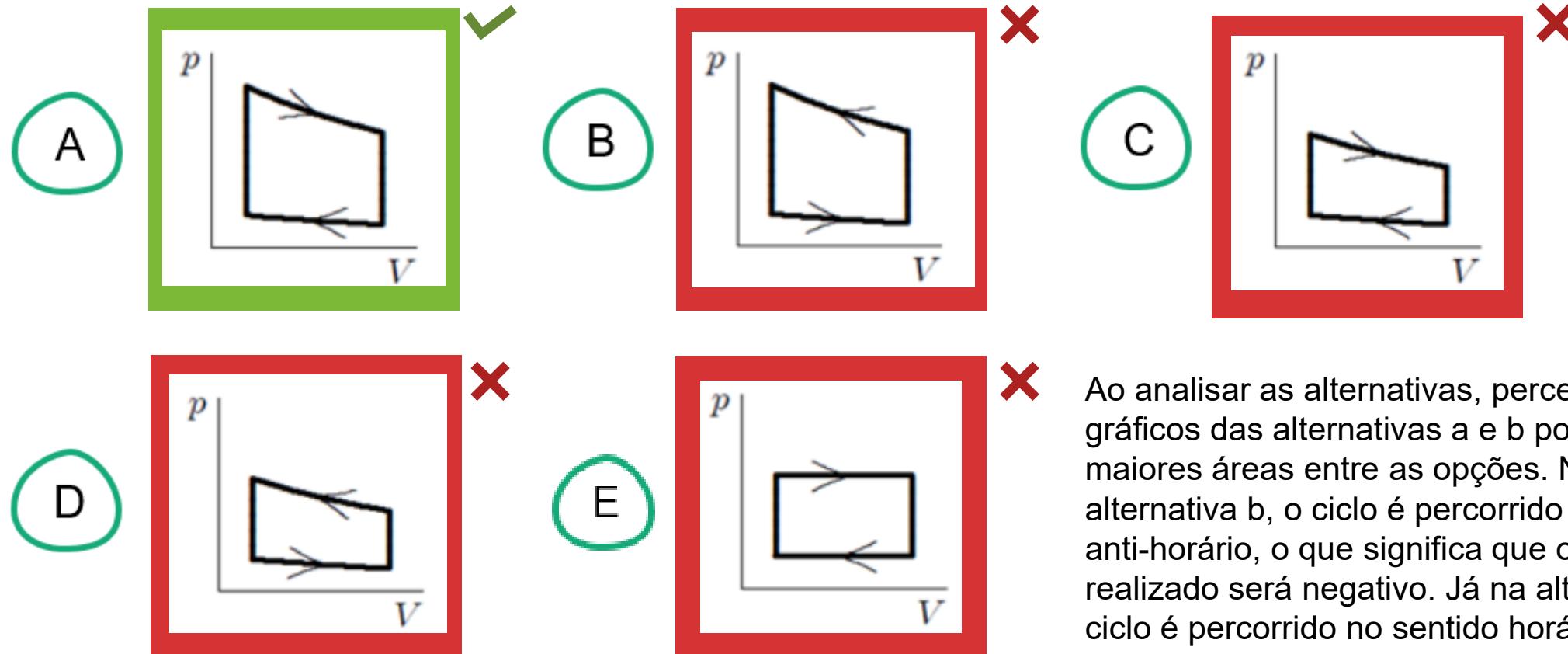


TODO MUNDO ESCREVE



## Correção

Para responder a essa questão, precisamos recordar que o trabalho realizado por um gás em um ciclo termodinâmico, representado em um gráfico de pressão versus volume, é numericamente igual à área da figura formada pelo ciclo. Se o ciclo for percorrido no sentido horário, o trabalho realizado é positivo. Se o ciclo for percorrido no sentido anti-horário, o trabalho é negativo.



Ao analisar as alternativas, percebemos que os gráficos das alternativas a e b possuem as maiores áreas entre as opções. No entanto, na alternativa b, o ciclo é percorrido no sentido anti-horário, o que significa que o trabalho realizado será negativo. Já na alternativa a, o ciclo é percorrido no sentido horário, o que indica que o trabalho realizado será positivo. Dessa forma, a alternativa correta é a a.

## Calor trocado em um ciclo

Quando um gás evolui em um ciclo, ele geralmente passa por etapas em que recebe calor ( $Q > 0$ ) e outras, em que cede calor ( $Q < 0$ ). A soma algébrica dos calores trocados entre o gás e o meio externo é a soma algébrica dos calores em cada etapa. Veja o exemplo ao lado:

$$Q_{\text{ciclo}} = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{DA}$$

$$Q_{\text{ciclo}} = +50 \text{ J} + 70 \text{ J} - 30 \text{ J} - 40 \text{ J}$$

$$Q_{\text{ciclo}} = +50 \text{ J}$$

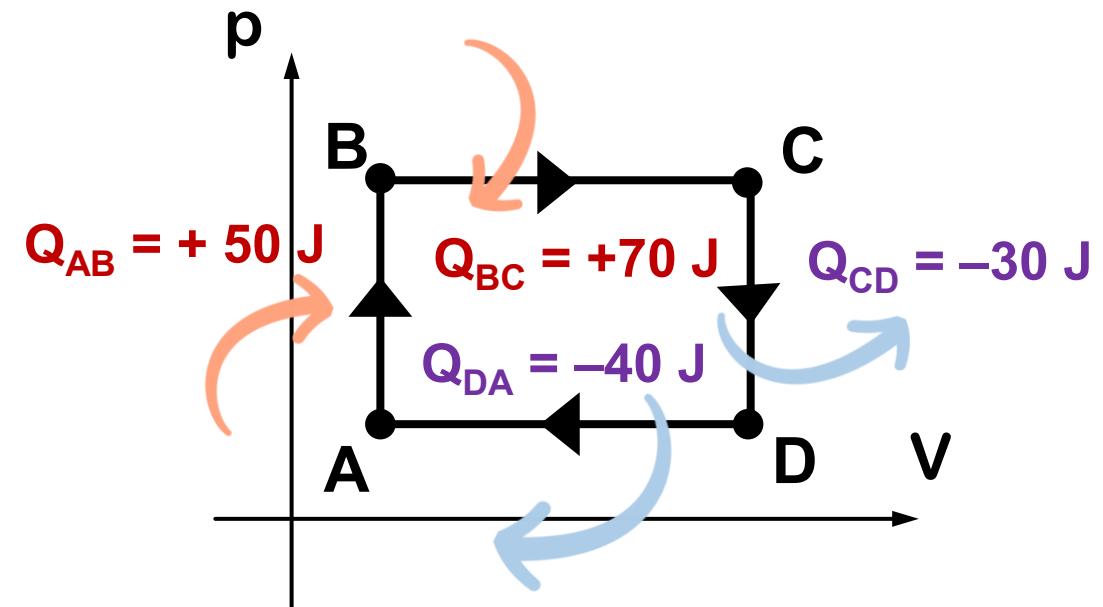


Gráfico p-V de um gás perfeito monoatômico, no qual o gás parte do ponto A (estado A) e evolui para BCD, retornando ao seu estado inicial.

## Calor trocado em um ciclo

O valor encontrado anteriormente ( $Q_{\text{ciclo}} = 50 \text{ J}$ ) indica que, em cada ciclo (ABCD), o gás utiliza 50 J de energia para realizar trabalho. Isso significa que esse ciclo converte calor em trabalho.

Em todos os ciclos termodinâmicos **percorridos no sentido horário**, vale a relação:

$$Q_{\text{ciclo}} = \tau_{\text{ciclo}} > 0$$

Esses ciclos estão relacionados às **máquinas térmicas**, assunto que analisaremos nas próximas aulas.

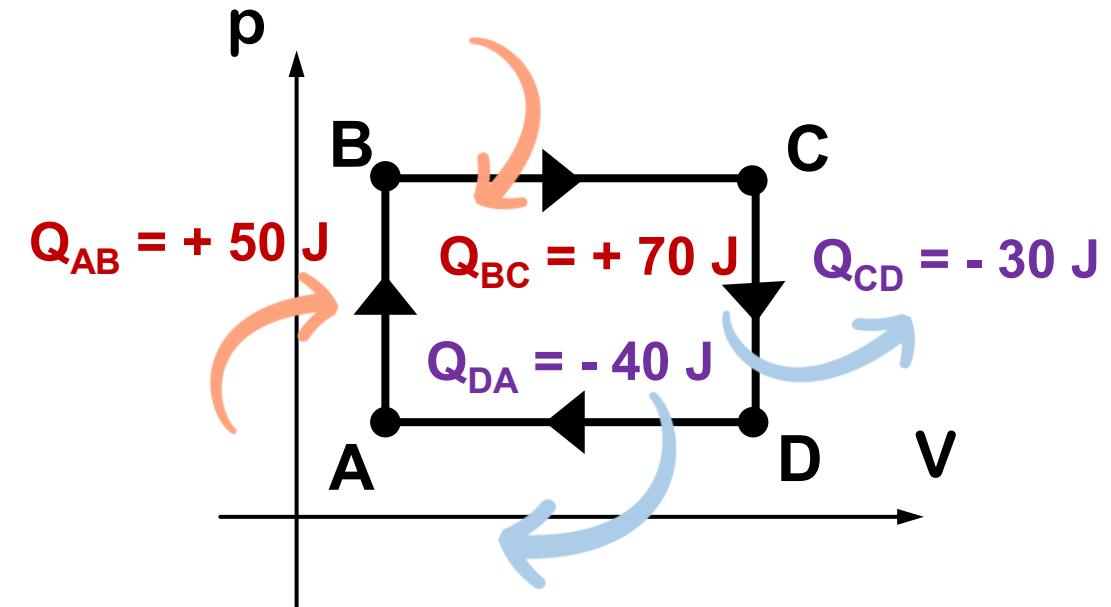


Gráfico p-V de um gás perfeito monoatômico, no qual o gás parte do ponto A (estado A) e evolui para BCD, retornando ao seu estado inicial.

## Ciclos termodinâmicos

VIREM E CONVERSEM



5 minutos

Na aula de hoje, aprendemos sobre ciclos termodinâmicos e as implicações relacionadas à 1<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica.

Sobre este tema, conversem e respondam:

**Se a variação total da energia interna em um ciclo termodinâmico é zero, o que isso implica sobre o estado final do sistema em relação ao estado inicial?**

**Durante um ciclo termodinâmico, por que é possível ter uma quantidade líquida de calor trocado com o ambiente, mesmo que a variação da energia interna seja zero?**

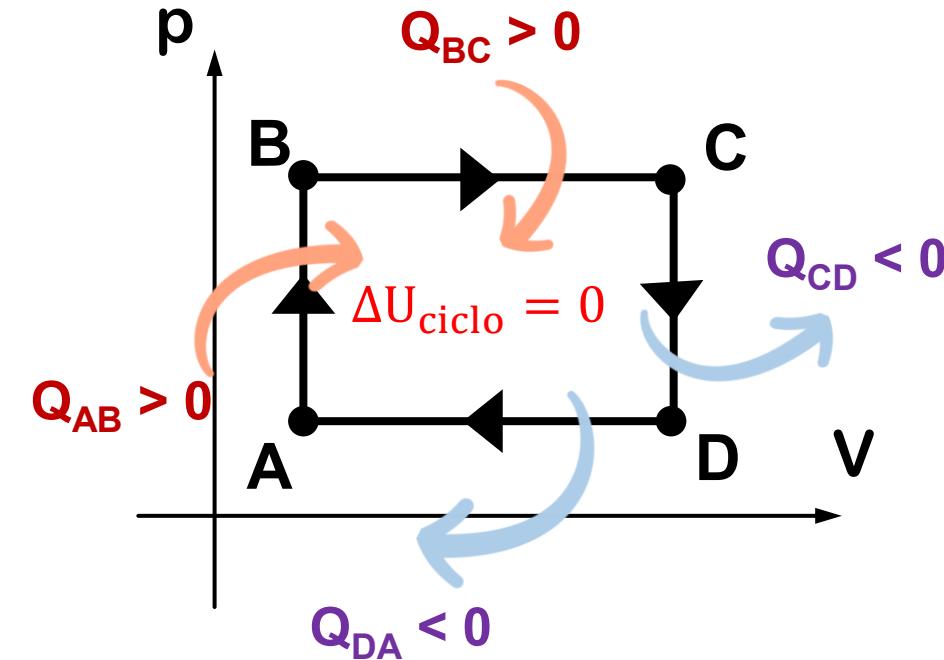


Gráfico p-V de um gás perfeito monoatômico, no qual o gás parte do ponto A (estado A) e evolui para BCD, retornando ao seu estado inicial.

Produzido pela SEDUC-SP.

- BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. **Tópicos de física**, v. 2. São Paulo: Saraiva, 2012.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA (ITA). **Vestibular**, 2009. Física. Disponível em: [https://vestibular.ita.br/provas/fisica\\_2009.pdf](https://vestibular.ita.br/provas/fisica_2009.pdf). Acesso em 12 nov. 2024.
- LEMOV, D. **Aula nota 10**: 49 técnicas para ser um professor campeão de audiência. São Paulo: Da Boa Prosa; Fundação Lemann, 2011.
- PIETROCOLA, M. et al. **Física**: conceitos e contextos, v. 3. São Paulo: Editora do Brasil, 2016.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. **Curriculum Paulista**: etapa Ensino Médio, 2020. Disponível em: [https://efape.educacao.sp.gov.br/curriculopaulista/wp-content/uploads/2023/02/CURRÍCULO-PAULISTA-etapa-Ensino-Médio\\_ISBN.pdf](https://efape.educacao.sp.gov.br/curriculopaulista/wp-content/uploads/2023/02/CURRÍCULO-PAULISTA-etapa-Ensino-Médio_ISBN.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.
- UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA (UDESC). **Vestibular**, 2018. Caderno de prova (tarde), 2º semestre. Disponível em: [https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id\\_cpmenu/17802/2018\\_2\\_Prova\\_Vespertino\\_17134619632214\\_17802.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/17802/2018_2_Prova_Vespertino_17134619632214_17802.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA (UDESC). **Vestibular de inverno**, 2017. Caderno de prova (tarde), 2º semestre. Disponível em:  
[https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id\\_cpmenu/17802/2018\\_2\\_Prova\\_Vespertino\\_17134619632214\\_17802.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/17802/2018_2_Prova_Vespertino_17134619632214_17802.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.

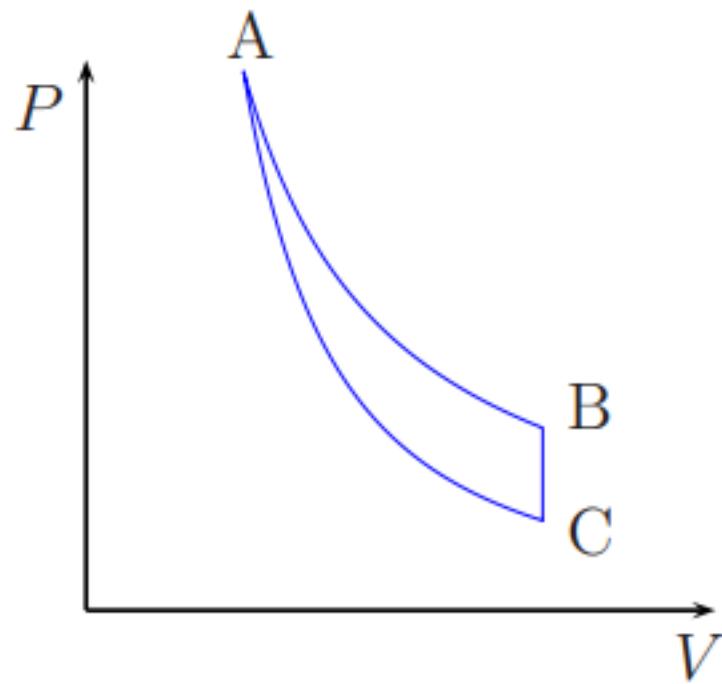
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA (UDESC). **Vestibular vocacionado**, 2009. 1ª fase, 1ª etapa. Disponível em:  
[http://antigo.vestibular.udesc.br/anteriores/2009\\_2/provas\\_objetivas\\_2009\\_2.pdf](http://antigo.vestibular.udesc.br/anteriores/2009_2/provas_objetivas_2009_2.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.

YAMAMOTO, K.; FUKE, L. F. **Física para o ensino médio**, v. 2. São Paulo: Saraiva, 2016.  
Identidade visual: imagens © Getty Images.

# Aprofundando

A seguir, você encontra uma seleção de exercícios extras, que ampliam as possibilidades de prática, de retomada e aprofundamento do conteúdo estudado.

**(ITA 2009)** Três processos compõem o ciclo termodinâmico ABCA mostrado no diagrama  $P \times V$  da figura. O processo AB ocorre a temperatura constante. O processo BC ocorre a volume constante com decréscimo de 40 J de energia interna e, no processo CA, adiabático, um trabalho de 40 J é efetuado sobre o sistema. Sabendo-se também que em um ciclo completo o trabalho total realizado pelo sistema é de 30 J, calcule a quantidade de calor trocado durante o processo AB.



## Correção

O trabalho do ciclo pode ser dividido na soma dos trabalhos parciais de cada um dos processos:

$$\tau_{\text{ciclo}} = \tau_{AB} + \tau_{BC} + \tau_{CA}$$

Pelo enunciado, sabemos que  $\tau_{\text{ciclo}} = 30 \text{ J}$ .

A transformação BC é isométrica, logo:  $\tau_{BC} = 0$

Também pelo enunciado, o trabalho em CA é  $\tau_{CA} = -40 \text{ J}$ , uma vez que se trata de uma compressão (negativo).

Substituindo na equação inicial,

$$30 = \tau_{AB} + 0 - 40 \Rightarrow \tau_{AB} = 70 \text{ J}$$

Na transformação AB, a temperatura permanece constante, logo, não há variação de energia interna ( $\Delta U_{AB} = 0$ ).

Pela primeira Lei da Termodinâmica:  $Q_{AB} = \tau_{AB} + \Delta U_{AB}$

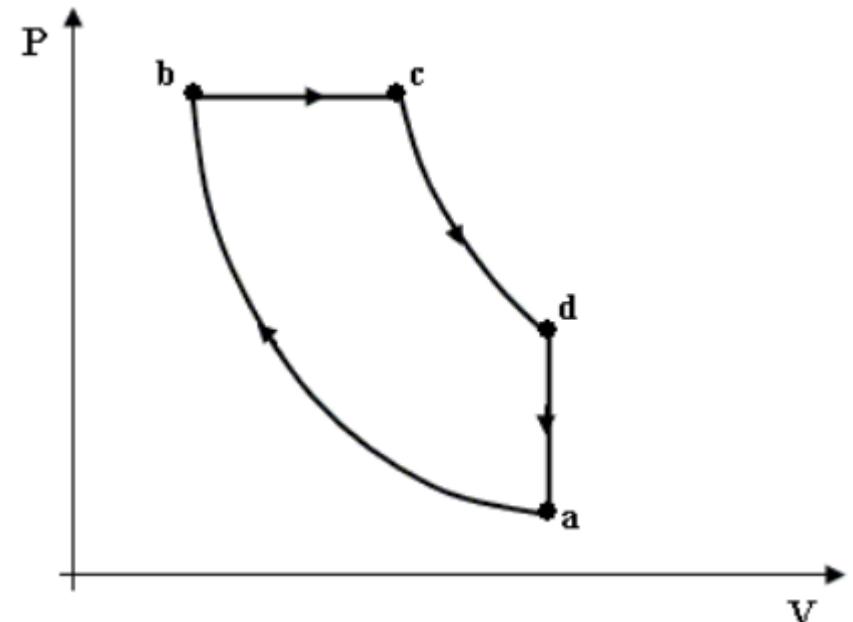
Portanto,

$$Q_{AB} = 70 \text{ J}$$



**(UDESC 2009)** O Ciclo Diesel ilustrado na figura abaixo representa, de forma aproximada, o comportamento de um motor diesel. O processo ab é uma compressão adiabática; o processo bc é uma expansão à pressão constante; o processo cd é uma expansão adiabática e o processo da é um resfriamento a volume constante. Analisando esse diagrama, é correto afirmar que:

- A no processo da, a energia interna do sistema diminui.
- B no processo ab, não há realização de trabalho pelo sistema.
- C no processo bc, não há variação de temperatura no sistema.
- D no processo cd, a quantidade de calor fornecida ao sistema é igual ao trabalho realizado pelo sistema.
- E no ciclo completo, a variação da energia interna do sistema é negativa.



## Correção:

- A no processo da, a energia interna do sistema diminui. ✓
- B no processo ab, não há realização de trabalho pelo sistema. ✗
- C no processo bc, não há variação de temperatura no sistema. ✗
- D no processo cd, a quantidade de calor fornecida ao sistema é igual ao trabalho realizado pelo sistema. ✗
- E no ciclo completo, a variação da energia interna do sistema é negativa. ✗

Para o processo **da**, como o volume é constante, pela equação de Clapeyron, sabemos que se a pressão diminui, a temperatura diminui:

$$\Delta P \cdot V_{\text{cte}} = n \cdot R \cdot \Delta T$$

Logo, como a temperatura diminuiu, a energia interna do sistema também diminui.

$$\Delta U = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot \Delta T$$

Secretaria da  
Educação  SÃO PAULO  
GOVERNO DO ESTADO