



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br



Crítica-Construtiva da Questão de Física (053) do ENEM/03/12/2016.

Neste verbete, faremos uma análise crítica-construtiva da Questão de Física (053) do ENEM/03/12/2016, compreendendo seu enunciado, alternativas propostas e a resposta dada em seu Gabarito. Para essa análise, vou me colocar na posição de um aluno que seja interessado em saber mais do que os livros didáticos normalmente apresentam, que navega na Internet sobre o contexto histórico-conceitual da Física e da Tecnologia, e que lê livros sobre a História da Ciência e sua relação com a Tecnologia, uma vez que cada Questão de Física das Provas do ENEM sempre procura estabelecer aquela relação.

Questão 053: *Até 1824 acreditava-se que as máquinas térmicas, cujos exemplos são as máquinas a vapor e os atuais motores a combustão, poderiam ter um funcionamento ideal. Sadi Carnot demonstrou a impossibilidade de uma máquina térmica, funcionando em ciclos entre duas fontes térmicas (uma quente e outra fria), obter 100% de rendimento.*

Tal limitação ocorre porque essas máquinas:

- A) realizam trabalho mecânico;
- B) produzem aumento de entropia;
- C) utilizam transformações adiabáticas;
- D) contrariam a lei de conservação de energia;
- E) funcionam com temperatura igual à da fonte quente.

Segundo o Gabarito, a resposta é a alternativa: B.

Para a escolha da alternativa certa, o aluno que estou considerando começa a comparar a relação que existe entre as alternativas propostas e o que está escrito no enunciado da Questão. Assim, para isso, ele recorda o que sabe sobre as máquinas térmicas e o **ciclo de Carnot**. Até o início do Século 19, as máquinas a vapor mais conhecidas, eram as inventadas pelos engenheiros: 1) **Máquina de Savery** – o inglês Thomas Savery (c.1650-1715), em 1698; 2) **Máquina de Newcomen** – o inglês Thomas Newcomen (1663-1729), em 1705; 3) **Máquina de Polzunov** – o russo Ivan Ivanovich Polzunov (1728-1766), em 1763; e 4) **Máquina de Watt** – o escocês James Watt (1736-1819), em 1790.

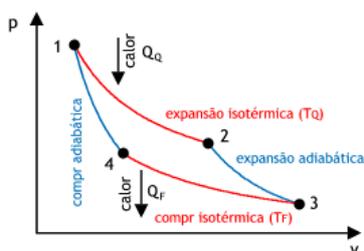
Contudo, essas máquinas apresentavam uma eficiência (**rendimento**) muito baixa, cerca de 5% a 7%. Em vista disso, em 1803, o general e engenheiro militar francês Lazare Nicolas Marguerite Carnot (1753-1823) estudou essa deficiência denominada por ele de **força viva virtual**, usando o conceito de **função potencial** e que significava o **trabalho** [conceito este proposto pelo astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), em seu célebre livro **Discorsi e Dimostrazione Matematiche intorno a Due Nuove Attenenti alla Mechanica ed i Movimenti Locali**

(“Discursos e Demonstrações em torno de Duas Novas Ciências Atinentes à Mecânica e aos Movimentos Locais”), publicado em 1638] realizado para deslocar um corpo entre dois pontos de sua trajetória em um campo gravitacional, segundo definiu o matemático e astrônomo francês Pierre Simon, Marquês de Laplace (1749-1827), em 1782. Note-se que, logo depois, em 1807, o físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829) publicou o livro intitulado **Lectures on Natural Philosophy** (“Conferências sobre Filosofia Natural”) no qual usou o termo **energia** no sentido hoje conhecido, qual seja: - *a capacidade de realizar trabalho*. Portanto, a **função potencial** passou a ser denominada de **energia potencial**.

Esse estudo de Lazare Carnot foi retomado por seu filho, o físico francês Nicolau Léonard Sadi Carnot (1796-1832) e apresentado em seu livro intitulado **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propes à Développer cette Puissance** (“Reflexões sobre a Potência Motriz do Fogo e sobre as Máquinas Próprias para Desenvolver essa Potência”), publicado em 1824. Nesse livro, Carnot descreve uma máquina ideal, sem atrito, que realiza um ciclo completo, de modo que a substância usada – vapor, gás ou outra qualquer – é levada de volta a seu estado inicial. Desse modo, Carnot afirmou: - *A potência motriz do fogo (calor) é independente dos agentes empregados para produzi-la; sua quantidade é determinada somente pelas temperaturas dos corpos entre os quais, no resultado final, ocorre a transferência do calórico*. Nesse ciclo, mais tarde conhecido como **ciclo de Carnot**, o **calórico** [conceito introduzido pelo químico francês Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), em 1787] era transformado em “força mecânica” e essa transformação dependia apenas da diferença de temperatura absoluta entre a da **fonte quente** (caldeira: T_1) e a da **fonte fria** (condensador: $T_2 < T_1$). É oportuno notar que a **potência motriz do fogo** usada por Carnot é hoje denominada de **rendimento** (η), dada por: $\eta = (T_1 - T_2)/T_1 = 1 - T_2/T_1 < 1$.

Ao comparar a “queda” do **calórico** em sua máquina com a queda da água em uma caixa d’água e, ao considerar o fato de que essa água pode voltar à sua caixa por intermédio de uma bomba, Carnot concluiu que sua máquina poderia trabalhar de modo *reversível*, isto é, ora deixando o calórico “cair” da fonte quente para a fonte fria, ora “subindo” da fonte fria para a fonte quente. Havia, no entanto, uma pergunta intrigante, qual seja: como era que a conservação do calórico nesse processo *reversível* se coadunava com a conservação do **calórico** nos processos *irreversíveis* como, por exemplo, a produção de **calor** por atrito nas famosas experiências realizadas pelo físico anglo-norte-americano Sir Benjamin Thompson, Conde de Rumford (1753-1814), em 1798 e 1799. Carnot estava consciente dessas dificuldades tanto que, em 1832, em uma série de notas escritas pouco antes de morrer (sua morte ocorreu em 24 de agosto de 1832) e publicadas após sua morte, descreveu novas experiências nas quais procurava determinar o **equivalente mecânico do calor** (J), pois começara a desconfiar da “materialidade” do **calórico**. Observe-se que J só foi determinado pelo médico e físico alemão Julius Robert Mayer (1814-1878), em 1842 (*Annalen der Chemie und Pharmacie* **42**, p. 233), em trabalho intitulado **Bemerkungen über die Kräfte der Unbelebten Natur** (“Observações sobre as Forças da Natureza Inanimada”) e no qual Mayer calculou J relacionando a “quantidade de força” de um peso que cai de uma altura aproximada de 365 m e a “quantidade de calor” necessária para aquecer igual peso de água de 0°C a 1°C. Desse modo Mayer encontrou, em unidades atuais, o valor: $J = 3,65$ joules/caloria.

Além do mais, a **Máquina de Carnot** foi estudada pelo físico francês Benoit-Pierre-Émile Clapeyron (1799-1864), em 1834 (*Journal de l'École Polytechnique* **14**, p. 190), ocasião em que o **ciclo de Carnot** foi pela primeira vez representado graficamente (hoje, esse gráfico é conhecido como **diagrama P-V**) por duas transformações **isotérmicas** (que mantém a temperatura constante) e por duas **adiabáticas** (que mantém a troca de calor constante). De posse desse gráfico e de sua famosa Equação dos Gases Perfeitos ($PV = n RT$), Clapeyron demonstrou, matematicamente, que a produção de **trabalho** na **Máquina de Carnot** dependia somente da diferença de temperatura absoluta entre os reservatórios térmicos considerados por Carnot. E mais ainda, que a máquina e o gás utilizado na mesma retornavam ao seu estado inicial, no final de cada ciclo, com o **calórico** sendo conservado nesse ciclo (*Google/Imagens*):



É interessante registrar que, sobre o livro de Carnot (**Réflexions**), ocorreram polêmicas entre os Historiadores da Ciência como, por exemplo, a de que se relacionava com o fato de Carnot haver usado, distintamente, os termos **calor** (*chaleur*) e **calórico** (*calorique*). Para alguns desses Historiadores, o **calórico** de Carnot seria a antecipação do conceito de **entropia** ($dS = \delta Q/T$, sendo δQ a **troca de calor** e T a **temperatura**) proposto pelo físico alemão Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), em 1865 (*Annalen der Physik und Chemie* **125**, p. 353). [V. K. Lamer, *American Journal of Physics* **22**, p. 20 (1954) e *American Journal of Physics* **23**, p. 95 (1955)].

Em vista desse histórico, nosso hipotético aluno consultou as alternativas propostas e verificou que as três primeiras: A) *realizam trabalho mecânico*; B) *produzem aumento de entropia*; C) *utilizam transformações adiabáticas*, poderiam ser marcadas, uma vez que, no contexto histórico (ano de 1824) apresentado no enunciado do problema, elas estavam contempladas, de maneira indireta. Assim, ele relembra da afirmação de Carnot em seu **Réflexions** (1824): - *A potência motriz do fogo (calor) é independente dos agentes empregados para produzi-la; sua quantidade é determinada somente pelas temperaturas dos corpos entre os quais, no resultado final, ocorre a transferência do calórico*. Examinando-a com a devida atenção, ele vê que a alternativa A relaciona-se com o trecho: - *... A potência motriz do fogo (calor) ...* uma vez que, mais tarde, em 1842 (Mayer), ela foi interpretada como “trabalho mecânico”. Por outro lado, a B está contida na frase: - *... no resultado final, ocorre a transferência do calórico ...*, já que este foi conceituado como **entropia**, em 1865 (Clausius). Por fim, a C resulta da parte restante do referido texto: *... é independente dos agentes empregados para produzi-la; sua quantidade é determinada somente pelas temperaturas dos corpos entre os quais, ...*, conforme foi demonstrado por Clapeyron, em 1834 (ver figura acima), ou seja: as trocas de **calor** (Q_1 e Q_2) com o meio ambiente acontecem nas **transformações isotérmicas** (T_1 e T_2), e a elevação (e a diminuição) de T decorrem das **transformações adiabáticas** (sem troca de Q com o exterior). Note-se

que a escolha de C, decorreu da ambiguidade da alternativa proposta: - *utilizam transformações adiabáticas*, ou seja, foi uma “pegadinha”, como é característica dos formuladores dessas provas do ENEM. Aliás, conforme mostrei em artigo publicado (www.searadaciencia.ufc.br/www.bassalo.com.br) no qual examinei o ENEM/2009, além de “pegadinhas”, esses formuladores não conhecem bem a História da Física, razão para haver mais de uma alternativa certa. Nesta questão em exame, esse desconhecimento aconteceu com o caso da A, uma vez que o Gabarito Oficial considerou B como a alternativa correta.

Portanto, em vista disso, nosso vestibulando escreveu cada uma das três alternativas em pedaços de papel, dobrou-os e, jogando-os para cima, pegou um deles e marcou como a alternativa que lhe parecia a certa. Ele só viu se acertou ou não quando recebeu o Gabarito Oficial do ENEM (no caso: B).



ANTERIOR

SEGUINTE