2A. LEI DA TERMODINÂMICA E ENTROPIA DIFICULDADES NO ENSINO E MEIOS PARA APRIMORAR A ASSIMILAÇÃO DE CONTEÚDO

Marco Antonio Soares de Paiva – marco.paiva@maua.br
Escola de Engenharia Mauá
Praça Mauá, 1
CEP: 09580-900 – São Caetano do Sul – São Paulo
Roberto de Aguiar Peixoto – robertopeixoto@maua.br
Giampaulo Nardini - giamnard@uol.com.br

Resumo: *O assunto de termodinâmica é tratado em disciplina regular de vários cursos de engenharia. A natureza de seu conteúdo exige raciocínio abstrato e tanto seu aprendizado como ensino exigem desafios. Os livros textos que abordam a termodinâmica na graduação são de excelente qualidade e conseguem, em certo sentido, equilibrar o rigor conceitual, o espaço disponível para tratamento do assunto e o nível de maturidade do aluno. Não obstante, há oportunidades ainda para aprimorar algumas técnicas didático-pedagógicas, principalmente nos tópicos da segunda lei da termodinâmica e da entropia. O presente trabalho faz uma breve revisão do ensino tradicional da segunda lei e propõe a adição de uma aula preliminar de preparação do aluno. Nela, alguns rigores e formalismos são minimizados e, com o apoio de um conjunto amplo de "slides" cuidadosamente preparados, com pouco texto e muitas figuras, trata-se de questões como conversão de energia, qualidade da energia e máquinas térmicas. O objetivo dessa aula é atrair o aluno para o entendimento básico do funcionamento do motor e do refrigerador térmicos, a impossibilidade de certos processos acontecerem e a importância da questão da eficiência de conversão energética.*

Palavras-chave: *termodinâmica, segunda lei, aprendizado, didática, entropia*

1. INTRODUÇÃO

Nos cursos de engenharia do Brasil e aparentemente de qualquer país do mundo, a termodinâmica é reconhecidamente uma ciência de difícil ensino e aprendizado. No Brasil, por exemplo, é disciplina fundamental dos cursos de engenharia Mecânica e Química, sendo oferecida normalmente na terceira série (3º. Ano).

Há vários livros textos de boa qualidade utilizados no ensino de graduação de Termodinâmica. Talvez o mais tradicional seja o de BORGNAKKE & SONNTAG (2009), de cujas edições mais antigas o Prof. Van Wylen era também um dos autores. Mais recentemente, o livro de ÇENGEL & BOLES (2006) foi incorporado como exemplo de texto de boa qualidade. A série em que termodinâmica é apresentada coincide com o período em que a maturidade acadêmica do aluno usualmente não está ainda muito desenvolvida. De outro lado, é aspecto observável que a geração jovem atual cresce em ambiente cultural com profusão de imagens de excelente qualidade, quase que "reais", encorajando os mais desavisados a acreditar na pouca necessidade de "modelos". Em vista disso, a construção de

modelos abstratos mentais de cognição é hoje menos exercitada do que, por exemplo, há 20 anos atrás.

Como resultado, apesar da profusão dos recursos atualmente disponíveis, o ensino atual da termodinâmica exige preparo e habilidades até mesmo maiores do que os dos anos 80 e 90. A pretensão deste trabalho é explorar alguns dos aspectos pertinentes a essa questão, sugerindo metodologia que contribua para aprimorar o ensino da Termodinâmica nos cursos de Engenharia.

Para completar a introdução do assunto, cabe citar também que há excelente literatura tratando da termodinâmica em nível de pós-graduação. Como exemplo, há os livros de TESTER & MODELL (1997) e BEJAN (1988), ambos bastante estimulantes no aprofundamento de conceitos e na abstração de ideias em termodinâmica.

Com o objetivo de facilitar a exposição de ideias no limitado espaço aqui disponível, o termo energia térmica será frequentemente utilizado como substituto do conceito mais geral e rigoroso de energia interna.

2. ENSINO TRADICIONAL DA 2ª. LEI DA TERMODINÂMICA

A 2ª. Lei da Termodinâmica é abordada nos livros tradicionais de graduação de Engenharia com a apresentação dos seguintes fundamentos: conceito de máquina térmica cíclica (motor térmico e refrigerador/bomba de calor), fluidos de trabalho e índices de desempenho das máquinas térmicas, enunciado da 2ª. Lei da Termodinâmica segundo Clausius e Kelvin-Planck, conceito de moto-perpétuo, ciclo de Carnot, rendimento da máquina térmica de Carnot, escala termodinâmica de temperatura e desempenho das máquinas de Carnot versus o das máquinas reais.

2.1. Conceito de motor térmico e refrigerador/bomba de calor

Há várias formas de apresentar o ciclo termodinâmico elementar de um motor térmico. BORGNAKKE & SONNTAG (2009) utilizam um conjunto cilindro-pistão contendo gás em seu interior. Inicialmente um reservatório térmico transfere calor ao gás que se expande, fazendo que o êmbolo suspenda uma massa. Em seguida, retira-se a massa (que ganhou energia potencial), calor é transferido do conjunto para outro reservatório térmico, numa temperatura menor do que a anterior; o êmbolo e o gás retornam à condição inicial (o gás foi submetido a um ciclo) e trabalho útil é realizado sobre o meio externo. O processo é representado na Figura 1. A questão fundamental aqui é evidenciar a conversão de "energia térmica" (transferência de calor) em energia mecânica, de natureza diversa da anterior, através de trabalho mecânico.

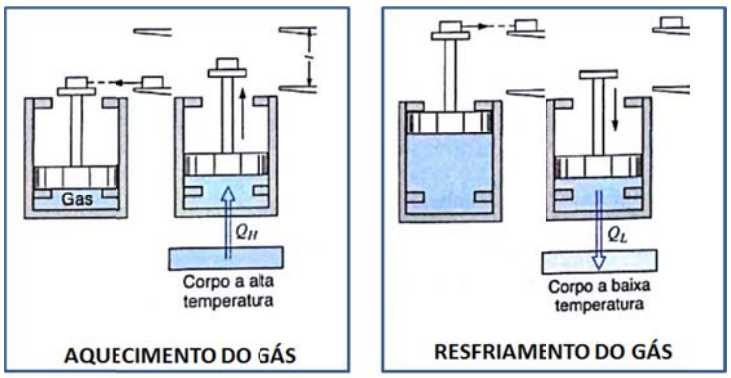

Figura 1 - Motor térmico elementar (BORGNAKKE & SONNTAG, 2009)

Como forma alternativa ao motor da Figura 1, é costume também apresentar o caso em que o motor opera em regime permanente, conforme Figura 2.

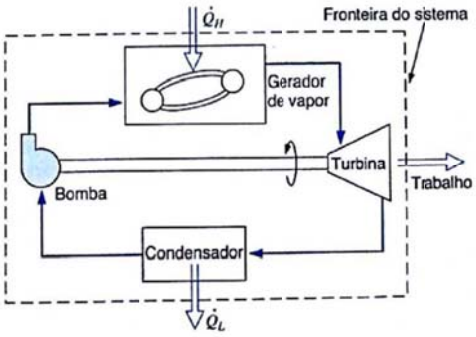

Figura 2 - Motor térmico em regime permanente (BORGNAKKE & SONNTAG, 2009)

O refrigerador térmico e a bomba de calor podem ser introduzidos de forma análoga.

2.2. Fluido de trabalho e desempenho termodinâmico

Para o exemplo do motor elementar anterior, a necessidade de utilizar uma substância de trabalho, no caso um gás, fica evidenciada. Além disso, o rendimento térmico do ciclo é definido:

$$\eta_{\text{TERMICO}} = \frac{\text{O que se produz de útil}}{\text{O que se gasta na produção}} = \frac{W_{\text{líquido}}}{Q_{\text{H}}} \tag{1}$$

2.3. Enunciado da 2ª. lei da termodinâmica

Os enunciados de Kelvin-Planck e Clausius da 2ª. lei da termodinâmica são em seguida apresentados, o texto quase sempre é acompanhado de figuras ilustrativas (vide Figura 3). A evidência experimental da 2ª. lei é sempre realçada.

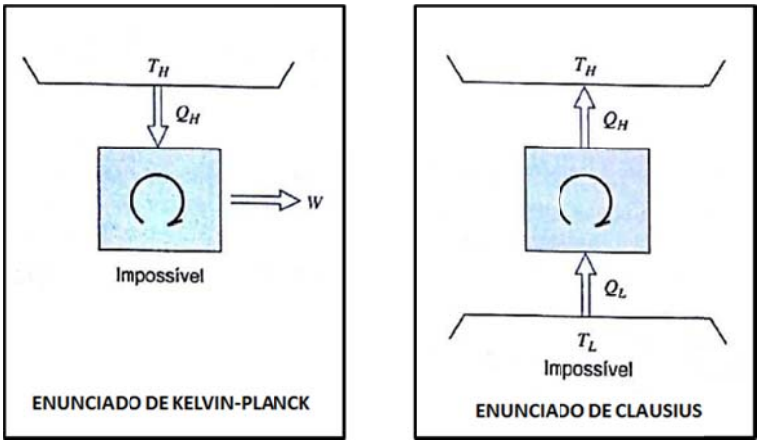

Figura 3 – Figuras ilustrativas para a apresentação da 2ª. lei da termodinâmica (BORGNAKKE & SONNTAG, 2009).

Nesse ponto fica evidente pelo enunciado de Kelvin-Planck que o rendimento termodinâmico de 100% é impossível a qualquer motor térmico.

Para evidenciar o enunciado de Kelvin-Planck, apresenta-se frequentemente o moto-perpétuo de segunda espécie, isto é, a constatação de que a violação da 2ª. lei da termodinâmica traria oportunidades para o aproveitamento da energia de um único reservatório térmico (os oceanos, por exemplo) para produção de trabalho líquido, confome

ilustrado na Figura 4. A constatação de que tal máquina não pôde ser construída até hoje é um fato que estimula o exercício mental do estudante.

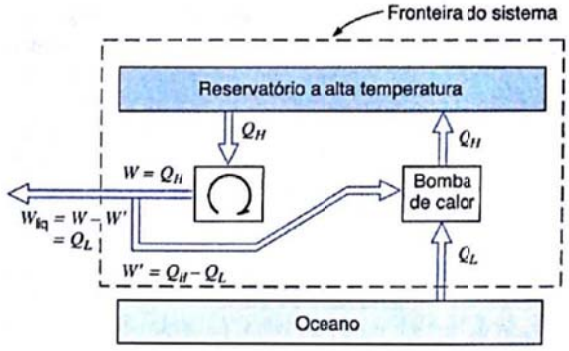

Figura 4 – Moto-perpétuo de segunda espécie (BORGNAKKE & SONNTAG, 2009).

2.4. Máquina térmica reversível e máquina de Carnot

Seguindo com o desenvolvimento tradicional, apresenta-se o conceito de processos reversíveis, resumidamente descritos como aqueles que podem ser revertidos sem deixar vestígios tanto no objeto de estudo (massa ou volume de controle) como no meio externo (ou seja, o Universo volta à sua condição inicial).

A máquina de Carnot é então introduzida. Fazendo uso da Figura 2 anterior, o motor térmico de Carnot em regime permanente é caracterizado pela existência de uma compressão e de uma expansão, ambas adiabáticas e reversíveis, além de dois processos de transferência de calor a temperatura constante – um deles ocorrendo na temperatura T_H, para o motor, e, o outro, na temperatura T_L, do motor para outro reservatório térmico. Destaca-se nos textos que a máquina de Carnot é reversível.

2.5. Rendimento da máquina de Carnot e escala termodinâmica de temperatura

O passo seguinte no desenvolvimento do tema é enunciar os seguintes teoremas:

- *Fixados dois reservatórios térmicos de temperaturas diferentes, é impossível construir um motor térmico com eficiência termodinâmica maior do que a do motor de Carnot.*
- *Todos os motores de Carnot que operam entre dois reservatórios térmicos de temperaturas diferentes, fixadas, têm o mesmo rendimento termodinâmico.*

Em conjunto, esses dois teoremas evidenciam que o rendimento do motor de Carnot é função apenas das temperaturas dos reservatórios térmicos. Nesse ponto é introduzido o conceito de escala termodinâmica de temperatura, a qual independe de fluidos e dispositivos termométricos, é adequada ao contexto do rendimento do ciclo de Carnot, além de se igualar à escala de temperatura de gás ideal.

3. DIFICULDADES OBSERVADAS NO APRENDIZADO DO ESTUDANTE

A apresentação da segunda lei da termodinâmica feita anteriormente é racional, conceitualmente rigorosa e, de certa forma, consegue equilibrar o espaço a ela destinada nos livros textos com o rigor e a didática requeridos. Não obstante, há dificuldades. Embora muitas vezes haja despreparo de certa parcela do corpo discente, não é pouco frequente que o próprio professor tenha dificuldade na organização de ideias. Com relação ao professor, observa-se ainda casos em que ele incorporou uma naturalidade na compreensão do assunto

que é bastante incompatível com a maturidade acadêmica e experiência do aluno. Serão agora enumeradas algumas das dificuldades frequentemente observadas nos alunos:

a) Pouco entendimento do funcionamento do motor térmico operando em regime permanente. Por exemplo, por que o fluido de trabalho troca calor sem mudar de temperatura (lembremo-nos, são alunos da 3ª. série)? Por que um quilograma de fluido submetido a uma elevação de pressão na bomba requer menos trabalho do que o que ele produz ao sofrer a mesma variação de pressão na turbina? O que é o eixo que liga a turbina à bomba?
b) Por que o fluido evapora e não muda de pressão?
c) Descrença na equivalência dos dois enunciados da 2ª. lei. O enunciado de Clausius é a evidência experimental na qual o aluno se alicerça. O enunciado de Kelvin-Plank gera desconfiança.
d) O motor de Carnot, máquina "perfeita", tem rendimento inferior a 100%, ao que o aluno retruca: *"- Como é que é isso?"*
e) O refrigerador térmico operando em regime permanente é mal compreendido, muitos não entendem como a condição (de regime permanente) pode ser atingida.
f) Após a introdução do conceito de entropia, a assimilação do conceito de "geração de entropia" é de difícil assimilação. No dizer do aluno: *"-Entropia não é uma propriedade da substância? Como ela pode surgir do nada?"*

4. POSSÍVEIS TÉCNICAS PARA MELHORAR A APRESENTAÇÃO DO ASSUNTO

4.1. Considerações iniciais

Em virtude das dificuldades de aprendizado dos alunos, a técnica ora apresentada divide a introdução da 2ª. lei da termodinâmica em duas etapas:

a) Uma aula inicial, em que o formalismo e o rigor não são muito relevantes. Procura-se apresentar, com muito pouca demonstração, alguns conceitos que preparem o aluno para o que se segue.
b) A aula seguinte completa a anterior e, agora, todo o formalismo e rigor são mais facilmente explorados.

A seguir são apresentados alguns aspectos considerados na aula inicial.

4.2. Reforço do conceito de calor e trabalho

A Figura 5 a seguir ilustra a questão. Os aspectos destacados na figura são: a) a possibilidade de transferência de energia térmica de um sistema para outro ("eficiência" de 100%) através de calor; observe que a palavra eficiência foi colocada entre aspas, uma vez que a qualidade da energia diminui no processo, isto é a eficiência exergética não é de 100%; b) a transferência de energia mecânica de um sistema para outro tem limite teórico de eficiência de 100% (agora sim, mesmo no campo exergético a eficiência máxima teórica é de 100%); c) tanto energia térmica como energia mecânica podem ser armazenadas.

Enquanto nos exemplos anteriores não há variação do tipo de energia nas interações energéticas havidas, na Figura 6 a seguir, energia elétrica é transferida na forma de trabalho a um sistema que armazena energia "térmica". O destaque é que, pelo senso comum, a "eficiência" de aquecimento por efeito Joule é de 100%. Deixar o aluno crer nisso por certo tempo não é de todo inconveniente.

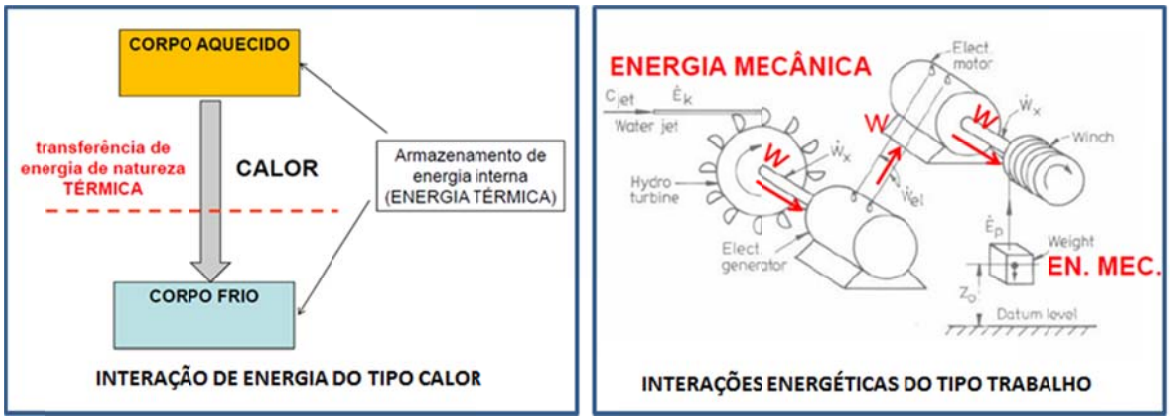

Figura 5 – Caracterização pictórica dos tipos de interações energéticas.

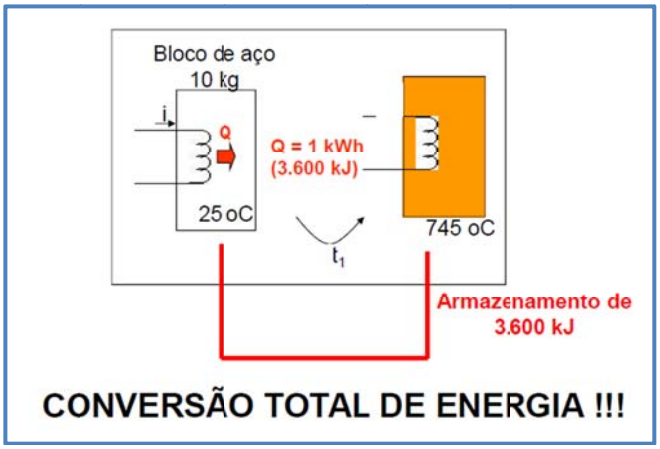

Figura 6 – Transferência de trabalho (energia elétrica) e sistema armazenando energia interna.

4.3. Motor térmico de Carnot estacionário

A dificuldade que o aluno tem nesse tópico pode ser atenuada com a apresentação da Figura 7 a seguir.

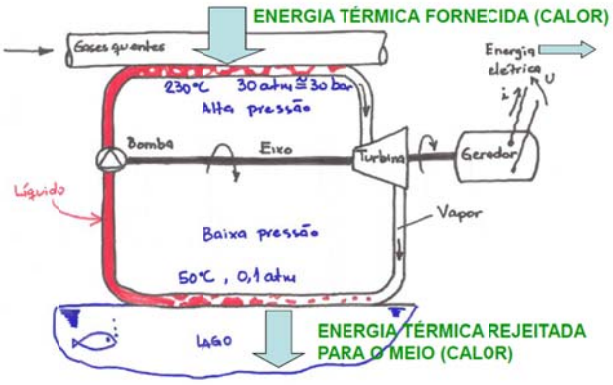

Figura 7 – Motor de Carnot estacionário.

O processo de evaporação e de condensação são destacados na figura, mas isso, por outro lado, enseja por parte dos alunos alguns questionamentos:

a) *"- Certo, se a pressão do fluido for constante no evaporador e no condensador, as temperaturas serão também constantes; mas a pressão do fluido não varia nesses equipamentos?"* A questão decorre da pouca experiência do aluno, que faz a errônea analogia com o processo de ebulição a volume constante. A melhor resposta aqui é apresentar rapidamente a equação da quantidade de movimento aplicada a um trecho elementar de tubo horizontal.

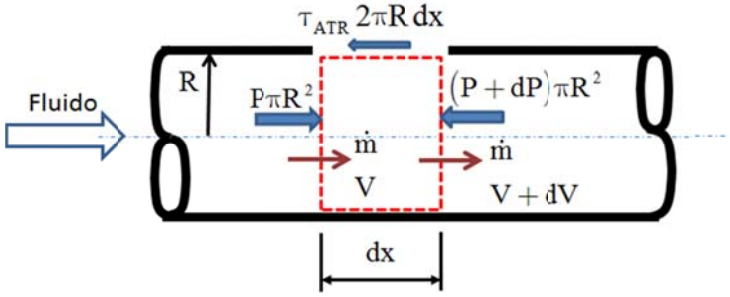

Figura 8 – Figura para aplicação equação da quantidade de movimento

A equação da quantidade de movimento para o volume de controle da Figura 8 é:

$$\sum F_{\text{ext}} = \text{Taxa de variação da quantidade de movimento} \tag{2}$$

$$\left[P-(P+dP)\right]\pi R^2 - 2\pi R\,dx\,\tau_{ATR} = \dot{m}\left[(V+dV)-V\right] \tag{3}$$

$$\frac{dP}{dx} = -\underbrace{\frac{\dot{m}}{\pi R^2}\frac{dV}{dx}}_{\text{ACELERAÇÃO}} - \underbrace{\frac{2}{R}\tau_{ATR}}_{\text{ATRITO}} \tag{4}$$

Pode agora ser mencionado que, se forem desprezados o termo de aceleração do fluido (que ocorre devido à variação da densidade) e o de atrito, a variação de pressão será nula no escoamento. No motor de Carnot essa simplificação é considerada.

b) Outra questão frequente dos alunos: *"- Tomando como referência um quilograma de fluido que realiza o ciclo, se o ΔP na bomba é o mesmo daquele na turbina, porque há trabalho líquido sendo fornecido ao meio?"* A questão deve ser esclarecida dizendo que, um pouco à frente, será demonstrado que, para máquinas adiabáticas ideais, vale a relação:

$$|w| = v_{\text{MEDIO}}\,|\Delta P| \tag{5}$$

Como na bomba o volume específico médio é bem menor do que na turbina, o trabalho específico dela é pequeno frente ao da turbina.

Em seguida, é conveniente fazer outras representações gráficas do motor de Carnot, conforme Figura 9 e Figura 10. Tais figuras facilitam a associação do motor com um sistema que "*converte calor em trabalho*", no dizer do aluno.

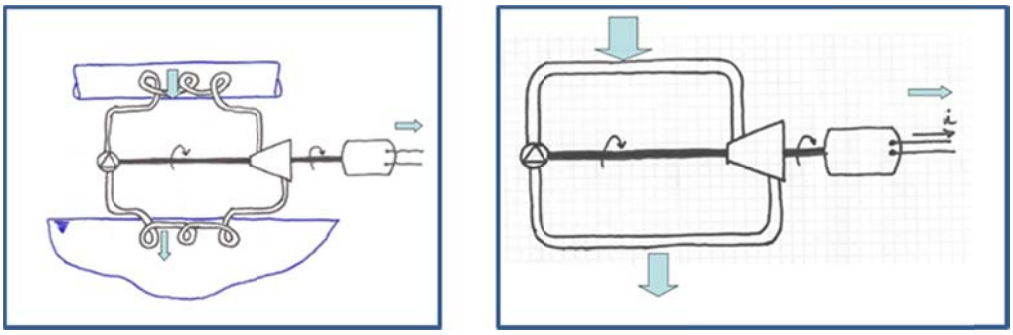

Figura 9 – Representações gráficas da máquina de Carnot que visam facilitar o entendimento do aluno

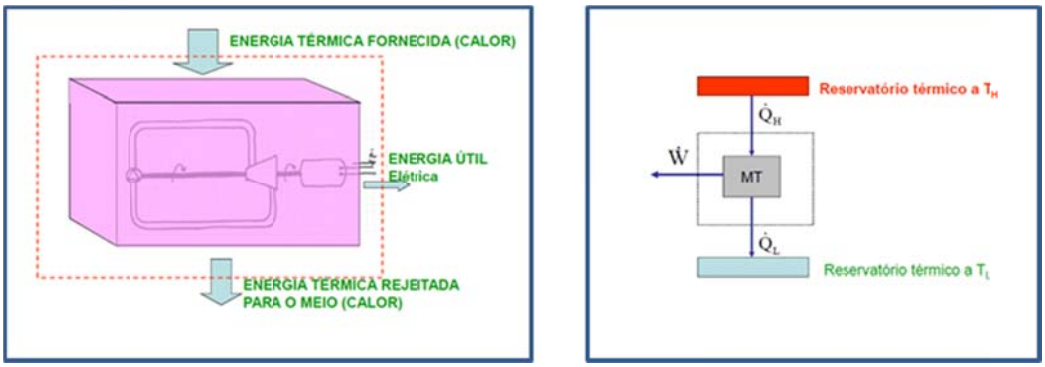

Figura 10 - Representações gráficas da máquina de Carnot que visam facilitar o entendimento do aluno.

4.4. A questão da eficiência máxima de um motor térmico

Uma representação que pode auxiliar a compreensão dessa questão é a da Figura 11.

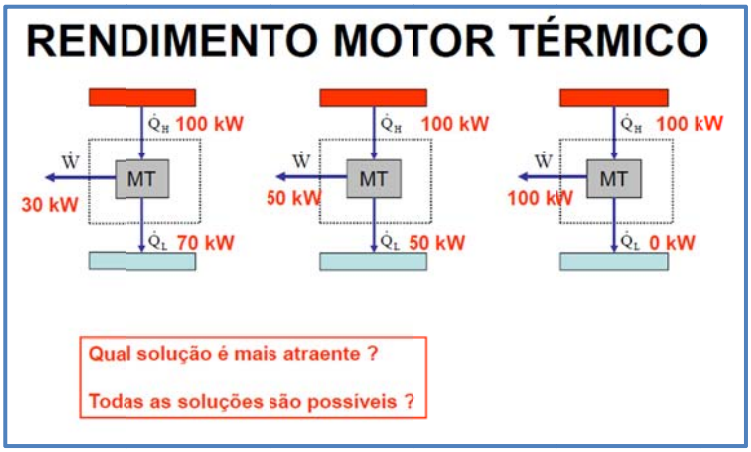

Figura 11 – Figura para auxiliar a compreensão da questão do rendimento de um motor térmico.

Nesse momento é oportuno então representar graficamente os “enunciados” da 2ª. lei da termodinâmica, Figura 12 – PARTE A. É possível associar agora a impossibilidade do motor térmico representado mais à direita na Figura 11 com o enunciado de Kelvin-Planck.

Por fim, transmite-se ao aluno o conceito de rendimento do motor de Carnot, salientando que é um valor máximo, que depende apenas das temperaturas dos reservatórios térmicos, algo a ser demonstrado quando da apresentação formal da 2ª lei da termodinâmica (vide Figura 12 – PARTE B).

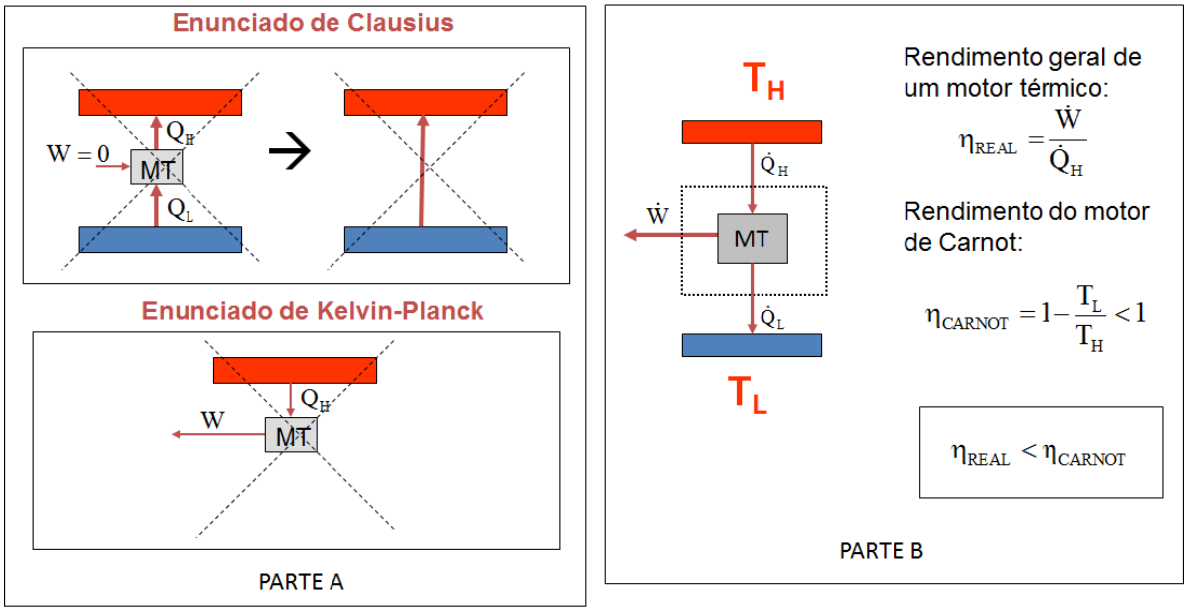

Figura 12 – Representação gráfica dos enunciados da 2ª. lei da termodinâmica e rendimento máximo.

4.5. Processos reversíveis e eficiência de conversão de energia

Não é usualmente difícil para o aluno médio compreender o conceito de processo reversível. Não obstante, a Figura 13 evidencia a ele a necessidade de uma análise mais aprofundada do assunto. Essa figura representa um bloco de aço de 10 kg, recebendo inicialmente aquecimento com a utilização de 1 kWh de energia elétrica, por meio de efeito Joule. O bloco atinge ao final a temperatura de 745 ^{o}C. Em seguida o bloco é resfriado de volta à temperatura inicial de 25 ^{o}C; o resfriamento é realizado por intermédio de um motor térmico de Carnot. Destaca-se que no processo de resfriamento a energia mecânica produzida (e que pode ser convertida em energia elétrica) é de apenas 0,4914 kWh.

Ao serem indagados sobre a parte do ciclo em que há "ineficiência", a resposta geral, quase que invariavelmente, é (de forma equivocada) que ela ocorre na etapa de resfriamento. Os alunos ficam estarrecidos quando recebem a resposta de que a "ineficiência" ocorre na etapa de aquecimento por efeito Joule e que a etapa de resfriamento do processo é totalmente eficiente.

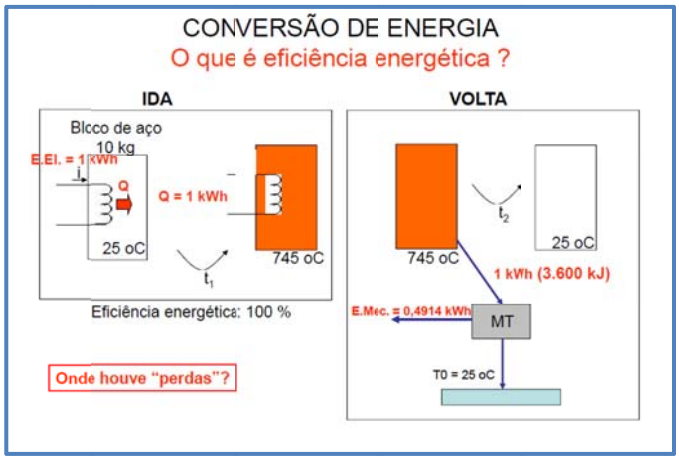

Figura 13 – Figura auxiliar na discussão de processos reversíveis e "eficiência de conversão energética".

Ou seja, a irreversibilidade ocorre apenas quando do aquecimento por efeito Joule. Para aplacar um pouco a ansiedade da plateia, são feitas as seguintes observações:

a) Uma vez que a etapa de aquecimento apresentada não é reversível, será apresentado nas aulas seguintes um equipamento (bomba de calor) que permite realizar o mesmo aquecimento com menor consumo de energia elétrica. Quando esse equipamento for reversível, o consumo de energia elétrica será mínimo.
b) Que um tipo real desse equipamento é comercializado e muito utilizado no aquecimento de piscinas. E que, além disso, é relativamente barato.
c) Que será visto em aulas seguintes o conceito de qualidade da energia. Por exemplo, energia "térmica" a alta temperatura tem mais qualidade do que a mesma quantidade de energia numa temperatura menor.
d) Que o tão decantado conceito de aumento da entropia do universo, do qual se apropriam em seus livros até mesmo muitos escritores, tem tudo a ver com o que foi apresentado.
e) Por fim, que melhor do que o conceito de geração de entropia, é mais prático utilizar um conceito equivalente, porém mais palpável, que é o de destruição da exergia.

Nesse ponto, a reação dos alunos vai da grande curiosidade pela próxima aula até a indignação completa de alguns (por acharem que tais assuntos serão de compreensão impossível).

4.6. Entendimento de uma máquina de refrigeração

Para melhorar o entendimento do funcionamento de uma máquina de refrigeração, inicialmente é feita uma representação como a da Figura 14. Nessa figura, a fase líquida é apresentada em vermelho. A variação de temperatura pequena do ar ambiente (meio de resfriamento no condensador) é estabelecida para aproximar esse meio de um reservatório térmico ideal.

Mesmo com o auxílio da Figura 14, percebe-se frequentemente no aluno certa desconfiança sobre a operacionalidade do ciclo refrigeração. Como se atinge a condição de regime permanente? Como elemento didático auxiliar, foi criado um conjunto de "slides" representando a dinâmica de partida de uma máquina de refrigeração, como apresentado na Figura 15, na Figura 16 e na Figura 17.

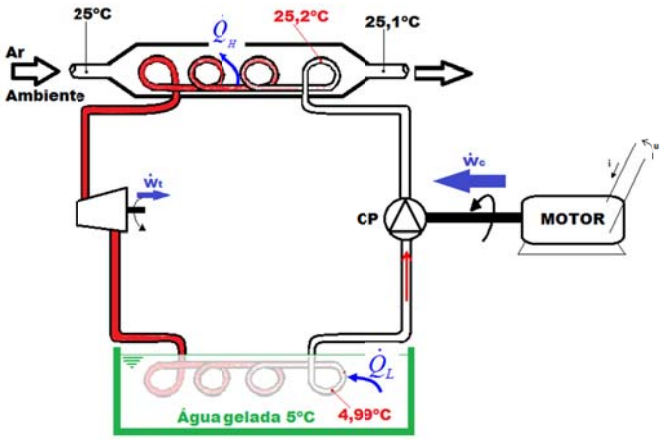

Figura 14 – Máquina de refrigeração em regime permanente.

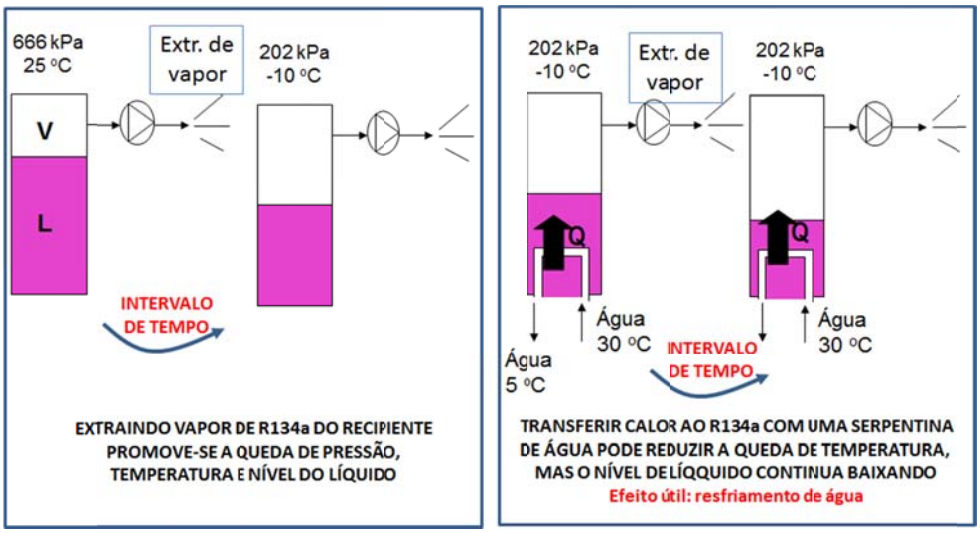

Figura 15 – Como iniciar processo de resfriamento de água em ciclo aberto de refrigeração

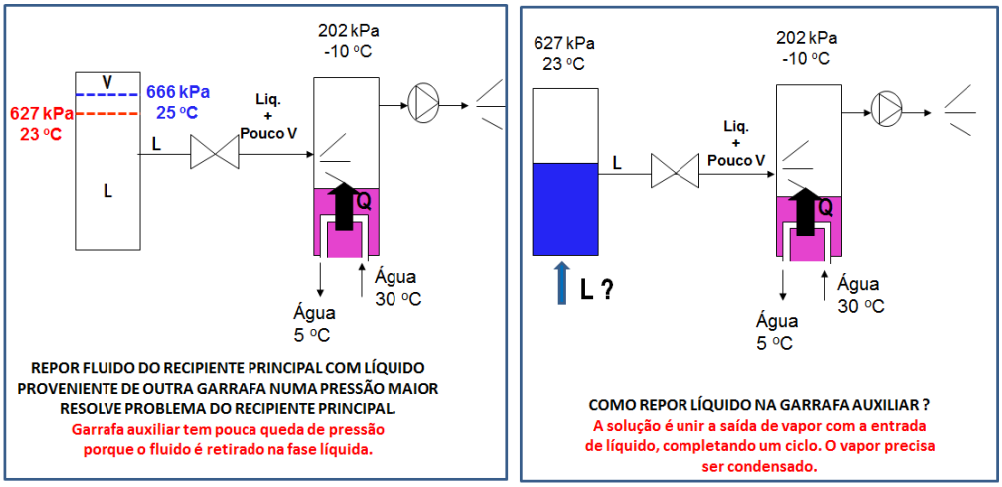

Figura 16 – Sequência de figuras evidenciando apenas a reposição de fluido no recipiente principal.

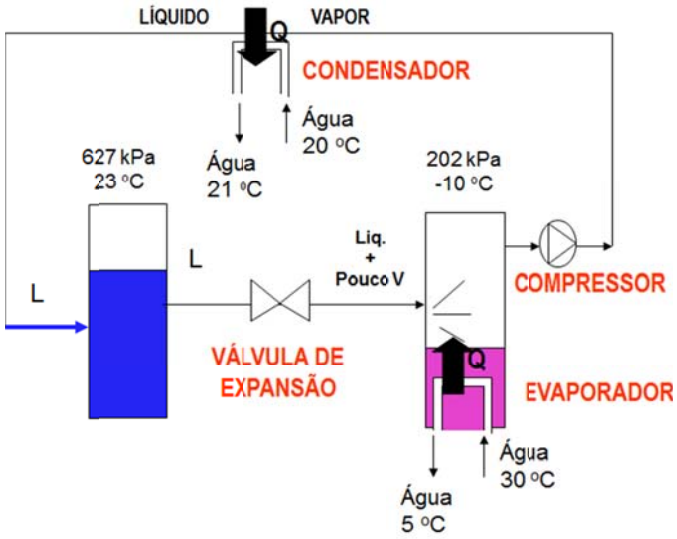

Figura 17 – Máquina de refrigeração com válvula de expansão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como mencionado, os recursos didático-pedagógicos apresentados na seção 4 anterior pretendem constituir-se em elementos coadjuvantes no ensino formal e rigoroso da 2ª. lei de termodinâmica, do qual não se pode prescindir. Ele é bastante apoiado em "slides" que destacam graficamente as questões tratadas, os quais têm sofrido contínuo aprimoramento, fruto da própria observação dos alunos. Fazendo uso de certa sensibilidade, procura-se destacar ao longo da aula inaugural que aplica tal metodologia didática, que muitos dos questionamentos dos alunos são naturais e provavelmente se desvanecerão de forma progressiva nas aulas seguintes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia o apoio concedido para desenvolvimento das técnicas propostas e sua divulgação no presente Congresso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEJAN, A. Advanced engineering thermodynamics. New York: John Wiley, 1988. 758 p.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.E. Fundamentos da Termodinâmica. 7.ed. São Paulo: Blucher, 2009. 461 p.

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. Termodinâmica. 5.ed. McGraw-Hill, 2006. 740 p.

TESTER, J.W.; MODELL, M. Thermodynamics and its applications. 3.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1997. 936 p.

SECOND LAW OF THERMODYNAMICS AND ENTROPY LEARNING DIFFICULTIES AND HOW THEY COULD BE OVERRIDDEN

Abstract: *For those graduation engineering courses having Thermodynamics in their curricula, presenting the topic of the second law is often a matter of difficulties for both students and instructor. This occurs in spite of the excellent text books treating the subject, due to the needs for rigorous concepts and the limited space available. After all, this topic is probably one where the distance between the instructor natural comprehension on the subject and the inexperience of the students is greatest. This work aims at proposing an initial class on the subject of the second law of thermodynamics, where the rigorousness is not a matter of primary importance. Otherwise the class seeks for more insights into the heat machines, the differences between heat and work, conversion between them, their qualities, as well as the issue of efficiency. All this is performed with the help of several slides having more graphics than texts.*

Keywords: *thermodynamics, second law, learning difficulties, entropy.*