



# PROPOSTA DE ENSINO DO CICLO STIRLING REUNINDO DUAS MÁQUINAS TÉRMICAS NA PERSPECTIVA DA MULTIMODALIDADE REPRESENTACIONAL COM AVALIAÇÃO FORMATIVA

## ***PROPOSAL FOR TEACHING THE STIRLING CYCLE BRINGING TOGETHER TWO HEAT ENGINES IN THE PERSPECTIVE OF REPRESENTATIONAL MULTIMODALITY WITH FORMATIVE ASSESSMENT***

**Osmar Henrique Moura da Silva**

osmarh@uel.br

*Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina – Londrina (PR)*

### **RESUMO**

No ensino da termodinâmica, vários estudos defendem ser pedagogicamente útil discutir o ciclo Stirling por meio de máquinas térmicas didáticas, podendo ser previamente à abordagem do ciclo de Carnot. Uma das razões provém da proliferação de versões simples dessas máquinas e que estão ao alcance no âmbito escolar com viabilidade de atividades experimentais relativas ao ciclo Stirling em situação real de sala de aula. Considerando tal relevância do ciclo Stirling nesse contexto, o presente trabalho objetiva contribuir com uma proposta educacional para facilitar entendimentos qualitativos do relacionado diagrama  $P$ - $V$  enquanto se ilustram características de uma máquina térmica, e que pode ser uma alternativa proveitosa em nível médio de ensino ao professor interessado. A proposta reúne duas versões de máquinas térmicas didáticas de ciclo Stirling, que são montagens portáteis e de baixo custo corriqueiramente divulgadas em vídeos no *Youtube*, com uma metodologia fundamentada no referencial da multimodalidade representacional como auxílio instrucional à almejada interpretação do diagrama  $P$ - $V$ . Ainda nessa metodologia, propõe-se a inclusão de um desafio por meio de uma dessas versões de máquina térmica na forma de avaliação formativa, a fim de enriquecer a reflexão com os aprendizes após inicial instrução dirigida pela outra versão, possibilitando ao educador analisar e acompanhar o desempenho dos alunos bem como reforçar os entendimentos focados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensino Médio; integração multimodal de representações; experimentos de baixo custo; produto educacional em termodinâmica; instrução do diagrama  $P$ - $V$ .

### **ABSTRACT**

*In the teaching of thermodynamics, several studies argue that it is pedagogically useful to discuss the Stirling cycle through didactic heat engines, which may be prior to approaching the Carnot cycle. One of the reasons comes from the proliferation of simple and affordable versions of these machines that are within reach in the school environment with the feasibility*

*of experimental activities related to the Stirling cycle in a real classroom situation. Considering such relevance of the Stirling cycle in this context, the present work aims to contribute with an educational proposal to facilitate qualitative understandings of the related P-V diagram while illustrating characteristics of a heat engine, and which can be a useful alternative in high school education to the interested teacher. The proposal brings together two versions of didactic Stirling cycle heat engines, which are portable and low-cost assemblies commonly disclosed in videos on Youtube, establishing a methodology based on the reference of representational multimodality as an instructional aid to the desired interpretation of the P-V diagram. Still in this methodology, it is proposed to include a challenge through one of these versions of the heat engine in the form of formative assessment, in order to enrich the reflection with the learners after an initial instruction directed by the other version, allowing the educator to analyze and monitor the performance of students as well as reinforce the desired understandings.*

**KEYWORDS:** *High School; multimodal integration of representations; low-cost experiments; educational product in thermodynamics; P-V diagram instruction.*

## INTRODUÇÃO

Em educação científica, o ciclo de Carnot é tradicionalmente descrito logo de início ao se abordar o tópico de máquinas térmicas por meio de uma introdução histórica em termodinâmica (LU *et al.* 2018, p. 1). Em livros de Física para o nível médio de ensino, quando muito, nota-se este ciclo seguido por discussões resumidas de outros ciclos termodinâmicos de motores à combustão interna presentes no cotidiano, como os ciclos otto e/ou diesel (GASPAR, 2000). Por sua vez, pode-se dizer que o ciclo Stirling é quase nunca referenciado em livros didáticos do Ensino Médio, enquanto o seja em propostas instrucionais divulgadas em periódicos e congressos (MÜLLER *et al.*, 2019; VICARI; CARVALHO, 2019; MARTINEZ; VARGAS, 2017; ASSIS *et al.*, 2009), mesmo com a maioria delas inteligível tão-somente aos anos iniciais de graduações (ZHU; XIANG, 2022; SAVALL-ALEMANY *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2018; DEACON *et al.*, 1994).

Todavia, há nessa literatura específica um entendimento convergente de natureza pedagógica, em que diferentes estudos defendem ser útil discutir o ciclo Stirling por meio de máquinas térmicas didáticas, podendo ser previamente à abordagem do ciclo de Carnot, já que “a máquina térmica de Carnot não é prática” (LEE; SEARS, 1969, p. 475). Conforme Assis *et al.* (2009, p. 220): “Sugerimos que a introdução do motor Stirling em sala de aula anteceda a abordagem do ciclo de Carnot, a fim de que a compreensão do ciclo que ocorre no motor Stirling favoreça a aprendizagem do ciclo de Carnot”. Já Deacon *et al.* (1994, p. 180) ressaltam que “o motor Stirling fornece uma aproximação à máquina de Carnot ...”, e defendem seu uso como ferramenta para ilustrar alguns conceitos termodinâmicos básicos. Coerentemente a isso, Zhu e Xiang (2022, p. 10) afirmam que “... o ciclo Stirling pode ser um importante suplemento ao ciclo de Carnot”. Aliás, máquinas de ciclo Stirling se tornam vantajosas à instrução em razão de menos idealizações quando se pondera o fato de serem de combustão externa com aspecto particular de contínua reciclagem do fluido de trabalho (WALKER, 1990, p. 140), diferindo-se das máquinas reais de combustão interna (ciclos otto e diesel, por

exemplo) nas quais “o sistema jamais pode voltar ao seu estado inicial”<sup>1</sup> (LEE; SEARS, 1969, p. 471). Enfim, justifica-se atrelada a essa recomendação, a constatação da proliferação de versões de máquinas térmicas simples e de custo acessível, e que estão ao alcance no âmbito escolar com viabilidade de atividades experimentais relacionadas ao ciclo Stirling em situação real de sala de aula.

De acordo com Lu *et al.* (2018, p. 1) e Savall-Alemany *et al.* (2020, p. 2), motores Stirling são empregados há muito tempo como demonstrações em divulgadas propostas educacionais, buscando ilustrar características de uma máquina térmica e interpretar um diagrama  $P-V$ , ainda que, avaliando essa literatura, elas permaneçam mais viabilizadas aos cursos de graduações nos quais a termodinâmica é estudada. Dada a relevância do ciclo Stirling nesse contexto, o presente trabalho objetiva contribuir com uma proposta educacional para facilitar entendimentos qualitativos do relacionado diagrama  $P-V$  em nível médio de ensino, e que pode ser uma alternativa proveitosa ao professor interessado. A proposta reúne duas versões de máquinas térmicas didáticas de ciclo Stirling, que são montagens portáteis e de baixo custo corriqueiramente divulgadas em vídeos no *Youtube*, estabelecendo uma metodologia fundamentada no referencial da multimodalidade representacional como auxílio instrucional à almejada interpretação do diagrama  $P-V$ . Ainda nessa metodologia, propõe-se a inclusão de um desafio por meio de uma dessas versões de máquina térmica na forma de avaliação formativa, a fim de enriquecer a reflexão com os aprendizes após uma inicial instrução dirigida pela outra versão, o que permite ao educador estabelecer uma avaliação e um acompanhamento do desempenho dos alunos, bem como reforçar os entendimentos almejados. Para tanto, a próxima seção delimita os entendimentos físicos envolvidos em nível qualitativo, especificando as duas versões de máquinas térmicas reunidas à proposta, com esta última discutida mais adiante por abrangência dos referenciais pedagógicos traçados.

## O CICLO STIRLING: DELIMITAÇÃO ADOTADA À CONJUNTURA TEORIA E PRÁTICA

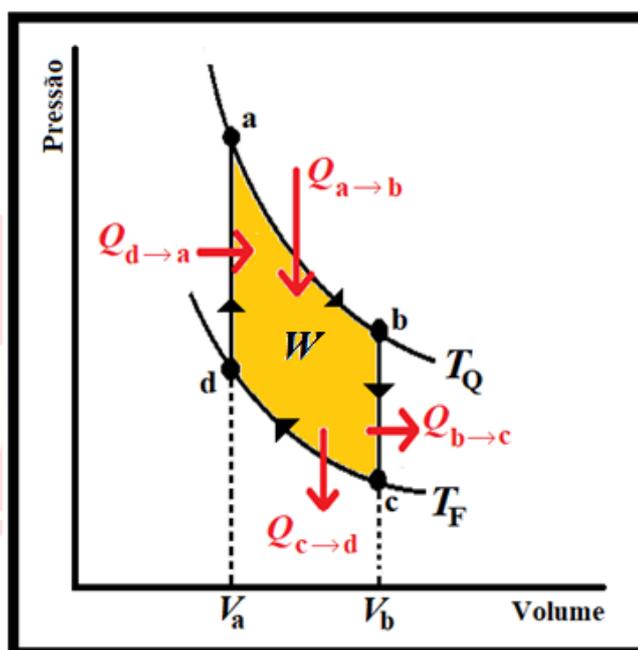
Delimitam-se, separadamente nesta seção e ao propósito deste trabalho, aspectos do ciclo Stirling e das duas versões de máquinas térmicas didáticas então empregadas. Também ao objetivo já mencionado, embora o ciclo Stirling possa ser representado nos diagramas  $P-V$  e  $T-S$  (LEE; SEARS, 1969, p. 494), restringir-se-ão discussões acerca do diagrama  $P-V$  em coerência ao que muitas propostas educacionais na literatura assim o fazem (LU *et al.*, 2018, p. 1), e pela razão distinta à aplicabilidade da presente proposta que aqui se destina com linguagem inteligível ao Ensino Médio.

---

<sup>1</sup> Curiosamente por rigor a esse quesito, “... devemos concluir que a máquina de combustão interna não é uma máquina térmica” (LEE; SEARS, 1969, p. 471). Em situação prática, “... a máquina de combustão interna não opera em um ciclo termodinâmico, (ela) efetua um processo termodinâmico ou uma sequência de processos termodinâmicos não-cíclicos” (LEE; SEARS, 1969, p. 472). Conforme Lee e Sears (1969, p. 471), válvulas de escape e admissão tornam o sistema aberto, sendo “extremamente difícil definir em termos específicos o que é que constitui o sistema em contradistinação ao ambiente ..., tornando necessária uma análise muito mais complicada”.

### O ciclo Stirling

Substituindo-se os dois processos adiabáticos do ciclo de Carnot por dois processos isocóricos, tem-se o ciclo Stirling, cujo diagrama  $P-V$  é indicado na Figura 1 para o ciclo de operação de uma máquina de Stirling ideal, havendo um fornecimento de calor na etapa  $a \rightarrow b$  para ocorrência de uma expansão isotérmica do sistema<sup>2</sup>, e também uma compressão isotérmica com rejeição de calor à vizinhança do sistema (etapa  $c \rightarrow d$ ). Em ambas as etapas isocóricas não há realização de trabalhos, estando, na etapa  $d \rightarrow a$  (Figura 1), o sistema absorvendo calor à medida que aumentam as grandezas pressão e temperatura. Situação inversa ocorre na liberação de calor da outra isocórica (etapa  $b \rightarrow c$ , na Figura 1), ou seja, tem-se diminuição conjunta das grandezas pressão e temperatura.



**Figura 1:** Diagrama  $P-V$  da substância de trabalho de uma máquina de Stirling ideal, supondo, por conveniência, que a substância de trabalho seja um gás ideal

Fonte: O autor.

O diagrama  $P-V$  da Figura 1 é meramente ilustrativo e corriqueiro, semelhantemente encontrado em Halliday *et al.* (2009, 258). Por tal diagrama, e assegurando que não haja variação de energia interna nas isotérmicas ( $a \rightarrow b$ ;  $c \rightarrow d$ ), mas sim energias transferidas por calor que se equivalem aos respectivos trabalhos executados (ora realizado pelo sistema, ora sobre ele), o rendimento térmico do ciclo Stirling vem a ser assim descrito (DICKERSON; MOTTMANN, 2019, p. 7):

$$n_{\text{Stirling}} = \frac{W_{\text{liq.}}}{Q_{\text{absorvido}}} = \frac{Q_{\text{absorvido}} - |Q_{\text{cedido}}|}{Q_{\text{absorvido}}} = \frac{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b} - |Q_{b \rightarrow c}| - |Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}} = \frac{Q_{a \rightarrow b} - |Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}} \quad (\text{Eq. 1})^3$$

<sup>2</sup> Fluido de trabalho que é normalmente o ar atmosférico (ou um gás), peculiaridade com a qual se encontra o apelido de uma máquina com esse ciclo termodinâmico de "motor de ar quente".

<sup>3</sup> Ou mais usual, conforme Lee e Sears (1969, p. 494):

$$n_{\text{Stirling}} = \frac{W_{\text{liq.}}}{Q_{\text{absorvido}}} = \frac{W_{d \rightarrow a} + W_{a \rightarrow b} - W_{b \rightarrow c} - W_{c \rightarrow d}}{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}} = \frac{W_{a \rightarrow b} - W_{c \rightarrow d}}{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Como as duas isocóricas do ciclo da Figura 1 estendem-se entre as mesmas isotérmicas, tem-se:

$$Q_{d \rightarrow a} = n c_v (T_Q - T_F) \quad (\text{Eq. 3}) \quad \text{e} \quad Q_{b \rightarrow c} = n c_v (T_F - T_Q) \quad (\text{Eq. 4})^4, \text{ o que implica em}$$

$$Q_{d \rightarrow a} = |Q_{b \rightarrow c}| \quad (\text{Eq. 5})$$

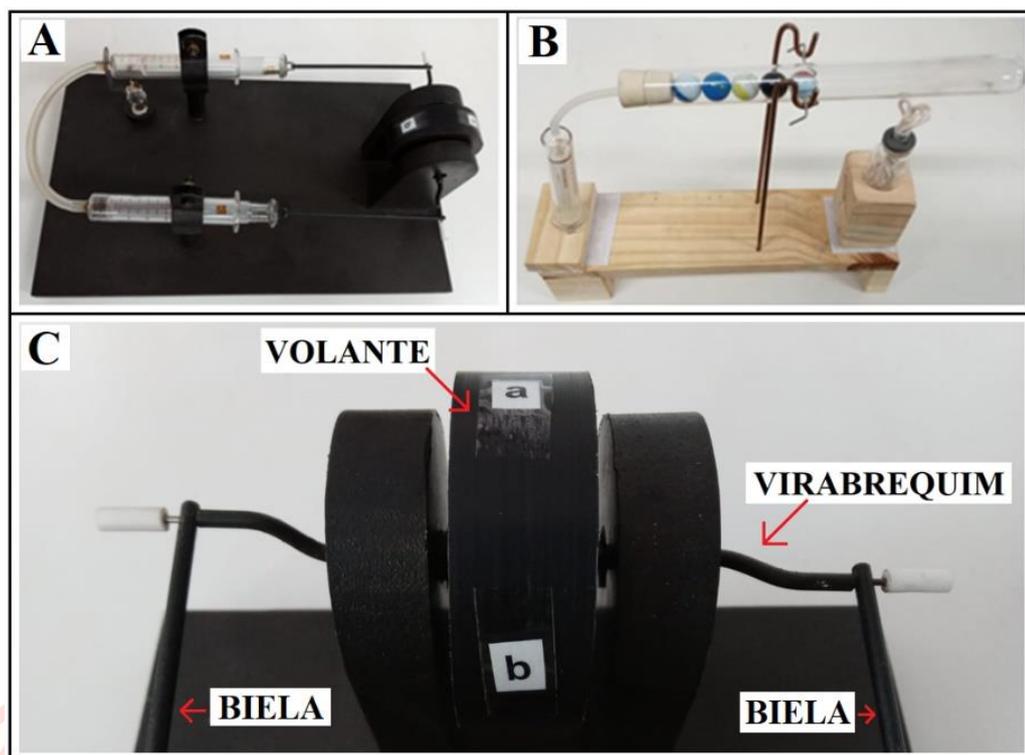
Logo, ambos os termos da eq. (5) se cancelam no numerador da eq. (1). Cabe notar que  $Q_{d \rightarrow a}$  ainda permanece no denominador da eq. (1), e não pode ser meramente ignorado gerando polemica na consideração de um regenerador reversível ideal e que permite de modo simplista concluir que o teorema de Carnot também abrange o ciclo de Stirling, em termos de rendimentos equivalentes. Maiores esclarecimentos nesse sentido podem ser vistos em Dickerson e Mottmann (2019). Todavia, no Apêndice, há uma síntese circundando a problemática abordada por esses autores (ibid.), entre demais referenciais aqui acrescentados, com o intuito de auxiliar a disseminar tais reflexões ao educador interessado. Assunto esse que caracteriza um alerta educacional importante e interligado à proposta defendida no presente artigo.

### Máquinas térmicas a sala de aula

A Figura 2 apresenta as duas máquinas térmicas didáticas de ciclo Stirling construídas e sugeridas nesta proposta, vindo como razões à seleção de tais versões: 1) o fato de serem de vidro transparente e incolor, aspecto que favorece a instrução do diagrama  $P$ - $V$  em comparação com versões que impossibilitam uma contínua visualização do volume do sistema durante as transições do relacionado diagrama  $P$ - $V$ , situação incomum e que não se encontra em muitas versões como na divulgada por Walker (1990) entre outras<sup>5</sup>; 2) Atrelado a esse aspecto, destaca-se o lento funcionamento da segunda versão (Figura 2B, BOADA apud SAVALL-ALEMANY *et al.*, 2020), sendo pedagogicamente proveitoso para o acompanhamento e identificação das transições envolvidas no referido ciclo termodinâmico; 3) São de baixo custo e portáteis; 4) Particularmente a uma categorização que envolve a primeira versão (Figura 2A), classificada de *alpha*, há menor complexidade no arranjo das peças envolvidas (pistões, bielas e virabrequim) quando comparadas com versões denominadas de *beta* ou *gamma* (WANG *et al.*, 2016, p. 90) e 5) A segunda versão, por não incluir típicas bielas e virabrequim à rotação de um volante como em versões *alpha*, *beta* e *gamma*, apresenta uma peculiaridade distinta da energia mecânica armazenada às transições isocóricas, no caso aqui por comparação com a primeira versão da Figura 2A. Com tais características, a reunião dessas duas versões possibilita, como será visto, sugestionar uma estratégia pedagógica, cuja seqüência das discussões abrange uma avaliação formativa ao nível escolar já mencionado.

<sup>4</sup> Sendo  $n$  o número de mols e  $c_v$  o calor específico molar a volume constante (LEE; SEARS, 1969, p. 95), do gás ideal que é o fluido de trabalho. O calor específico a volume constante é definido como "a razão da capacidade calorífica correspondente à massa do sistema" ( $c_v = C_v/m$ ), mas que "também é útil definir o calor específico molar de uma substância pura, como sendo a razão da capacidade calorífica de um sistema constituído desta substância, ao número de mols:  $c_v^* = C_v/n$ " (LEE; SEARS, 1969, p. 95).

<sup>5</sup> Sendo elas comercializadas ou de fabricação caseira, exemplos: <<https://www.americanas.com.br/produto/1584991311>>, <<http://2015.febrace.org.br/virtual/2015/EXA/252/>>, <<https://pt.dhgate.com/product/mini-stirling-engine-kit-hot-air-stirling/448562883.html>>, <<https://fisicacuriosablog.wordpress.com/2016/07/24/motor-stirling/>>. Últimos acessos: 5 de junho de 2022.



**Figura 2:** A) Primeira versão; B) Segunda versão; C) Foto ampliada do conjunto “volante, virabrequim e bielas” da primeira versão

Fonte: O autor.

Detalhados tutoriais de montagens dessas versões simples da Figura 2, em linguagem adequada aos professores e estudantes do Ensino Médio, são comumente encontrados no *Youtube*<sup>6</sup>, envolvendo descrições de materiais necessários, montagens dos arranjos experimentais e execuções das demonstrações à visualização dos fenômenos físicos.

## PRODUTO EDUCACIONAL: ESTRATÉGIA DE ENSINO POR INTEGRAÇÃO MULTIMODAL DE REPRESENTAÇÕES COM AVALIAÇÃO FORMATIVA

De acordo com Laború e Silva (2011a), diversos estudos tratam do papel desempenhado pelo laboratório didático no ensino de ciências numa perspectiva da multimodalidade representacional ao aprimoramento de conceitos científicos. Nessa perspectiva, ao se fazer alusão à representação multimodal, “está a referir à integração no discurso científico de diferentes modos de representar o raciocínio ..., com o objetivo de que os alunos se apropriem do significado dos conceitos, conforme forem relacionando, isto é, compreendendo as diferentes formas representacionais” (LABURÚ; SILVA, 2011b, p. 21). Enquanto modos representacionais abrangem os meios ou “recursos perceptivos” (RADFORD *et al.* 2009, p. 91), “por meio dos quais as diversas formas representacionais podem ser expressas, pensadas, comunicadas ou executadas” (LABURÚ; SILVA, 2011, p. 22), o termo, múltiplas

<sup>6</sup>Exemplos: <<https://www.youtube.com/watch?v=5wrS-ZZCTIo>>; <<https://www.youtube.com/watch?v=qo7oPrD-Ev0>>. Últimos acessos: 5 de junho de 2022.

representações, refere-se à prática de representar um mesmo conceito ou processo científico em diferentes formas (PRAIN; WALDRIP, 2006, p. 1844; TYTLER *et al.*, 2007, p. 314). Uma categorização mais ou menos consensual dos modos de representação incluem formas do tipo descritivas (verbal, gráfica, tabular, diagramática, matemática), figurativas (pictórica, analógica ou metafórica), cinestésicas ou de gestos corporais (encenação, jogos), que usam objetos tridimensionais (3D) ou maquetes, experimentos etc (LABURÚ; SILVA, 2011a, p. 724).

Apoiando-se nesse referencial, propõe-se na presente estratégia o estabelecimento de uma particular integração multimodal de representações à discussão do diagrama  $P-V$  do ciclo Stirling. No caso, para além da representação do relacionado diagrama  $P-V$  que se ilustra à turma e da habitual representação prática por atividades experimentais<sup>7</sup> com máquinas térmicas, estar-se-á inserindo uma representação figurativa auxiliar para reflexão, considerando que “formas variadas de representação conseguem prover distintas inferências” (LABURÚ; SILVA, 2011a, p. 725). Como será discutida, a integração dessa última representação justifica-se no aprimoramento dos significados desejados, na medida em que, para isso, “diferentes representações dos conceitos e processos científicos devem ser trabalhadas” (LABURÚ; SILVA, 2011a, p. 724), constituindo maneiras distintas de significar sem que seja redundante (RADFORD *et al.*, 2007), inclusive podendo ser até mais simples e potentes que outras.

Em vista disso, após uma demonstração de funcionamento da máquina e à viabilidade do que se propõe, primeiramente, sobrevém uma sequência mais ou menos tradicional de ensino quando o professor expõe o ciclo Stirling por meio da representação idealizada do diagrama  $P-V$ <sup>8</sup>, visando associar cada uma das quatro etapas do ciclo às movimentações dos pistões no uso da primeira versão (Figura 2A). Já nesta ocasião com a máquina desligada, é fundamental direcionar a atenção dos alunos para a defasagem proposital de 90° que há entre as manivelas nas extremidades do eixo (virabrequim) do volante (WALKER, 1990, p. 140), por onde se acoplam as bielias (Figura 2C). O ponto a salientar, nesta versão, é que tal defasagem específica é que possibilita as alternâncias entre isocóricas e isotérmicas, podendo-se favorecer tal esclarecimento nesta típica representação experimental 3D ao anotar no volante os estados  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  para associação com a representação diagramática  $P-V$  (Figura 1).

Sugere-se que essas quatro letras convencionais sejam anotadas na circunferência do volante dessa versão, espaçadas entre 90° (Figura 2C), para ser movimentado lentamente com a mão pelo professor à observação e análise do volume do sistema nas transições isotérmicas e isocóricas, estando a indicar aos alunos as quatro etapas do ciclo durante uma volta completa do volante. Dentre os pontos esclarecedores nesta instrução, destaca-se ainda a observação de que na transição de  $a \rightarrow b$  durante a movimentação do volante<sup>9</sup>, “um dos

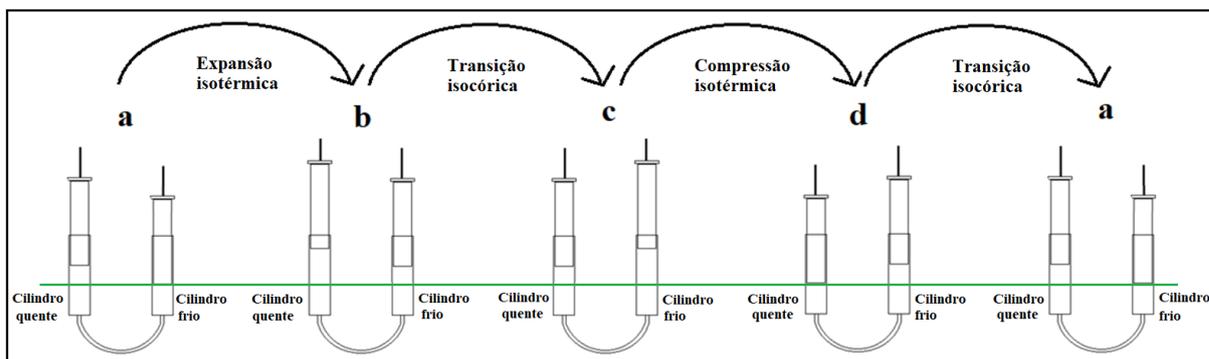
<sup>7</sup> A prática experimental em laboratório, como ressaltam Laburú e Silva (2011a, p. 731), “é um modo representacional fundamental a se destacar para auxiliar e complementar a construção dos processos científicos, os quais permanecem sustentados nas escolas, quase sempre, por exposições fixadas em modos de representações formais”.

<sup>8</sup> Semelhante ao da Figura 1, desenhando-o no quadro negro. É óbvio que, em nível médio de ensino, discussões sobre máquinas térmicas seguem posteriormente à instrução dos tópicos, a título de exemplo visto em Gaspar (2000): “Introdução à termodinâmica”, “Comportamento térmico dos gases”, “Calor” e “Leis da termodinâmica”.

<sup>9</sup> Que simultaneamente durante a instrução se associa à etapa  $a \rightarrow b$  da representação diagramática  $P-V$  da Figura 1.

pistões (lado quente) é movido pela expansão do ar (isotermicamente), enquanto nas outras três transições (duas isocóricas e uma compressão isotérmica), os dois pistões são movidos pela maquinaria<sup>10</sup> (WALKER, 1990, p. 141).

A partir daí, constituindo-se uma terceira representação integrante à explicação (Figura 3), o acréscimo da forma figurativa atende como “um modo representacional capaz, então, de se comportar tal qual um ‘andaime conceitual’, ao prover um apoio auxiliar para o sujeito construir o conceito almejado” (LABURÚ; SILVA, 2011a, p. 728), cuja forma figurativa exemplar segue ilustrada abaixo.



**Figura 3:** Modo de representação figurativa sugerido à instrução auxiliar da primeira versão, cujo desenho segue à observação das etapas da esquerda para a direita, coerente com o sentido horário na representação diagramática do ciclo P-V (Figura 1)

Fonte: O autor.

Nessa representação figurativa (Figura 3) tem-se um traço intencional que perpassa as seringas, mediante volumes individuais equivalentes de cada uma delas abaixo dessa marca. O traço vem a proporcionar uma comparação momentânea dos volumes do sistema entre um estado e outro, significando uma representação figurativa proveitosa educacionalmente. Está a dizer com isso que, se apresentado um modelo representativo similar ao da Figura 3 na ocasião<sup>11</sup>, o professor é facilitado a explorá-lo apontando que, ao se girar em 90° o virabrequim de  $a \rightarrow b$  na máquina (representação 3D), se tem um aumento de volume conforme indicado na Figura 3, associando tal movimentação à única etapa do ciclo em que isso ocorreu, isto é, uma expansão isotérmica; condição pela qual analogamente se pode explorar na instrução da compressão isotérmica representada na etapa  $c \rightarrow d$ . Ainda observando os desenhos da Figura 3, também se favorece os aprendizes a perceberem as transições isocóricas (etapas  $b \rightarrow c$  e  $d \rightarrow a$ ), uma vez que se ilustram qualitativa e simultaneamente as movimentações contrárias de pistões à retratação de volumes invariáveis. Portanto, o poder heurístico que se busca desta representação decorre dos tratamentos figurativos a serem executados não serem equivalentes aos de outras representações, perfilhando que, por uma figura, “se é capaz de perceber objetos e relações em um espaço de dimensão superior àquele que o raciocínio explícita e necessita” (LABURÚ; SILVA, 2011a, p. 726).

<sup>10</sup> Fator inercial nas transições isocóricas, mais o trabalho realizado pela vizinhança sobre o sistema na compressão isocórica.

<sup>11</sup> Por retroprojetor, Datashow, compartilhando por celular etc.

Ademais, por meio dessa integração multimodal de representações, algumas questões típicas às características da máquina térmica bem como servem para iniciar uma oscilação entre o ensino transmissivo e uma interação mais construtivista (SILVA; LABURÚ, 2013), produtivas à reflexão e ao debate de ideias, quais sejam: Analisando que na isotérmica de  $a \rightarrow b$  movimentam-se pistões por expansão do ar (sistema) ao passo que nas outras três transições os pistões são movidos pela maquinaria, o sistema realiza mais trabalho que a maquinaria sobre ele ou não? Se o comprimento das bielas for alterado, há mudança na velocidade de rotação do volante? Se inverter a defasagem de  $90^\circ$  entre as manivelas do virabrequim, há inversão do sentido de rotação do volante? O que aconteceria se esse ângulo de  $90^\circ$  entre as manivelas fosse alterado? E se variar o tamanho das manivelas, o que aconteceria? Se a fonte quente for substituída por uma vela no lugar da lamparina, o que aconteceria?

Mantendo a integração multimodal de representações nesse direcionamento da discussão em termos qualitativos, é importante pedagogicamente apreciar que o volume do ar (sistema) oscila de modo cíclico repetidamente, em que a compreensão do princípio de funcionamento envolve análises das temperaturas do ar além de se considerar que os trabalhos realizados nos pistões dependem diretamente das pressões. Em específico, na transição isocórica de  $d \rightarrow a^{12}$  (Figura 1) há um "salto" entre isotérmicas, um aquecimento do ar (sistema), o que desencadeia vigorosas colisões das moléculas do ar nos pistões em razão do aumento da pressão para a realização de trabalho útil que segue na transição isotérmica  $a \rightarrow b$ . Na etapa  $b \rightarrow c$ , esta outra transição isocórica constitui numa queda da temperatura do ar, agora com colisões relativamente mais fracas e com um trabalho realizado pela vizinhança do sistema sobre ele (etapa  $c \rightarrow d$ ); trabalho que é comparativamente menor na expansão. Cabe observar também que, durante esta compressão isotérmica, a pressão também é relativamente mais baixa que na expansão, o que permite concluir um trabalho útil resultante. Ainda, se faz necessário deixar claro que no ciclo Stirling, as transições isocóricas têm uma função de deslocamento de grande parte do ar (sistema) de uma fonte quente à fonte fria e vice-versa. Transições estas que ocorrem, neste caso, pelo fator inercial devido à manutenção da energia cinética rotacional do volante que se dá via transições isotérmicas; além de um detalhe do "motor de arranque" relacionado ao "tapa/empurrão" que se faz no volante, no sentido de rotação do mesmo para iniciar esta demonstração de funcionamento.

Logo, ao se ajuizar ministrados os esclarecimentos relativos do diagrama  $P-V$  para essa primeira versão de máquina térmica de ciclo Stirling, pela presente estratégia educacional pondera-se que: em razão das peculiaridades distintas das energias mecânicas armazenadas (mais adiante comentadas) às transições isocóricas entre as duas versões de máquinas adotadas (Figuras 2A e 2B), fica oportuno aplicar a outra versão (Figura 2B), encaminhando uma ação pedagógica em vantagem de uma avaliação formativa. Como é de conhecimento, "avaliação formativa é toda prática de avaliação contínua que pretenda contribuir para

---

<sup>12</sup> Por exploração da representação figurativa (Figura 3), é viável aclarar, caminhando de  $d \rightarrow a \rightarrow b$ , que há maior quantidade de ar no cilindro quente que no cilindro frio, o que significa que mais ar está sendo aquecido do que resfriado; situação inversa a ser identificada no sentido  $b \rightarrow c \rightarrow d$ .

melhorar a aprendizagem em curso, qualquer que seja o quadro e qualquer que seja a extensão concreta da diferenciação do ensino” (COSTA *et al.*, 2017, p. 46).

No contexto da avaliação formativa delineada por Bloom *et al.* (apud PEDROCHI Jr., 2017, p. 3), “se os instrumentos forem bem utilizados, podem fornecer a devida informação ao professor e aos alunos de quão adequadamente cada unidade está sendo aprendida”, quando se considera que “a natureza dessa unidade pode variar em função de diversos propósitos, podendo a unidade ser uma única aula”. Nesse sentido, a intenção em sala de aula é situar uma avaliação formativa logo após o estabelecimento dos esclarecimentos físicos envolvidos na demonstração com a primeira dessas máquinas térmicas e que, de acordo com Fernandes (2006, p. 23), decorre “sob a forma das chamadas revisões da matéria dada ou de um teste formativo”, antes da avaliação somativa. Por sua vez, a segunda máquina térmica (Figura 2B) encontra-se na fase em que há recapitulação de conteúdos e síntese, o que significa ser valoroso não somente o acompanhamento do desempenho, mas também a retomada de pontos estudados desde a exposição da demonstração propriamente dita, até o fechamento dos conceitos físicos relacionados. No que concerne a esse procedimento, é valoroso apresentar algumas questões típicas à reflexão e que possibilitam um direcionamento pedagógico no âmbito construtivista (SILVA; LABURÚ, 2013), não se caracterizando como únicas e fechadas, mas como norteadoras exemplares em tal situação:

- *Ao conteúdo de aprendizagem em nível qualitativo* – É desejado que os alunos reconheçam as quatro etapas do diagrama  $P$ - $V$  do ciclo Stirling (Figura 1) em situação 3D da segunda máquina térmica (Figura 2B). Todavia, perante uma provável dificuldade de análise por parte dos alunos, é prudente que o professor promova pistas que auxiliem a direcionar a atenção e concentração deles, cujos questionamentos podem rodear entendimentos como: O que constitui o sistema e o que constitui a vizinhança do sistema? Onde se encontram os reservatórios/fontes quentes e frios da máquina? O que indica a ocorrência de expansão do sistema e quando se nota a compressão do sistema? O número de esferas de vidro é determinante ao funcionamento da máquina? Ou seja, esta máquina opera com cinco esferas no interior do tubo, mas se alterar o número de esferas para mais ou para menos, há interferência no funcionamento? Durante o curto intervalo de deslocamento das esferas, há ou não variação do volume do sistema?

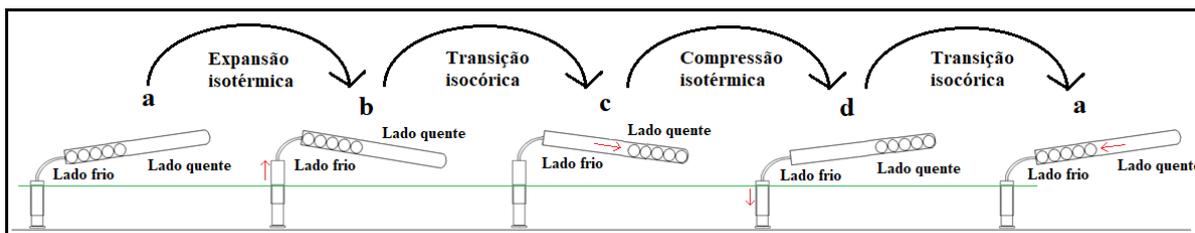
- *Avançando no diagnóstico de aprendizagem* – questões típicas podem ser: O que permite com que as esferas se desloquem ora de um lado e ora para outro lado do tubo? Qual é a função das esferas no interior do tubo? Que tipo de etapa do diagrama  $P$ - $V$  se pode classificar quando as esferas transitam de um lado a outro, isotérmica ou isocórica? Olhando o diagrama  $P$ - $V$ , em quais situações distintas de movimentação da máquina correspondem às etapas de expansão isotérmica e de compressão isotérmica, e o que se pode avaliar das variações de  $P$ ,  $V$  e  $T$  do sistema? Olhando o diagrama  $P$ - $V$ , em quais situações distintas de movimentação da máquina correspondem às duas transições isocóricas, e o que se pode avaliar das variações de  $P$ ,  $V$  e  $T$  do sistema?

Em atendimento aos dois pontos acima, que são posteriores à instrução pela primeira versão de máquina térmica, admite-se a composição de avaliação formativa agora com a segunda versão, viabilizando distinguir qual domínio que o aprendiz possui acerca dos

conteúdos e identificar o quanto ele está apto para avançar à próxima etapa do processo educacional, de forma gradual. No acompanhamento dos desempenhos dos alunos perante essa avaliação formativa, torna-se então compreensível que as duas formas representativas mais usuais permaneçam concentradas durante as discussões pelos dois pontos acima: o diagrama  $P-V$  do ciclo de operação de uma máquina de Stirling ideal (Figura 1) atrelada à demonstração experimental da Figura 2B (representação 3D). Como enfatizado aqui, essas questões apresentadas servem de exemplo ao que se pode encaminhar dentro de uma metodologia de perguntas (SILVA; LABURÚ, 2013), segundo um contexto construtivista em que se espera um *feedback* (MORTIMER; SCOTT, 2002), e uma vez ponderando que a dinâmica de sala de aula não é única e as discussões preliminares podem variar de uma turma para outra. Contudo, há uma situação previsível que se deve acrescentar ao preparo do educador na ocasião desta avaliação formativa, qual seja: 'Se porventura os alunos não retratam aprendizado'.

Sinalizado esse quadro na medida em que se avalia o esgotamento da metodologia de perguntas aos objetivos pedagógicos traçados num encaminhamento particular com professor e turma específicos, resta ao professor clarificar os detalhes de funcionamento da segunda versão de máquina térmica, assim como havia feito para a primeira versão, inclusive discutindo-a com esta. E como representação complementar à integração multimodal, a forma figurativa exemplar à segunda versão de máquina térmica, de modo auxiliar à instrução da mesma, segue logo sugerida a partir da Figura 4. Contudo, nesta altura já reconhecendo que a orientação instrucional tenha se movido pelo esforço e dedicação do professor, cabe aguardar que resultados de aprendizagem mais expressiva sejam averiguados mediante avaliação somativa. De todo modo, o emprego da segunda máquina térmica em situação de avaliação formativa possibilita um reforço dos conteúdos abordados, viabilizando aos estudantes uma oportunidade de recuperação de tais conteúdos, no sentido de metodologicamente proporcionar o alcance de um melhor nível da aprendizagem dos esclarecimentos relacionados.

Ainda é preciso dizer que, quanto à metodologia de perguntas, compete ao professor julgar o que é necessário selecionar dos raciocínios dos estudantes acerca de uma questão levantada, visando intercalar dúvidas em distinguidos momentos de "Interativo/dialógico, Não-interativo/dialógico e Interativo/de autoridade", para saná-las na etapa final de momento "Não-interativo/de autoridade" (MORTIMER; SCOTT, 2002, p. 288). É nesta etapa final que o professor apresenta "um ponto de vista específico" (ibid.), que é inevitável e ocorre de modo invariável no conteúdo específico focado. E em contribuição a esta última etapa discursiva "Não-interativo/de autoridade", os esclarecimentos físicos envolvidos em nível qualitativo para ambas as demonstrações de máquinas térmicas ao idealizado diagrama  $P-V$  estão aqui sugeridos numa estratégia com integração multimodal de representações, discutindo-se abaixo a particular forma figurativa que se exemplifica (Figura 4) à segunda versão de máquina térmica de modo auxiliar nesta instrução.



**Figura 4:** Modo de representação figurativo sugerido à instrução auxiliar da segunda versão, cujo desenho destina-se à observação das etapas, da esquerda para a direita, coerente com o sentido horário na representação diagramática do ciclo P-V (Figura. 1)

Fonte: O autor.

Por esse modelo representativo da Figura 4, fica pedagogicamente útil ao professor direcionar a atenção dos alunos para o traço intencional colocado, atravessando o desenho das seringas para promover uma comparação momentânea entre os volumes do sistema em cada um dos estados ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ). Analisando essa Figura 4, à medida que a seringa sobe de  $a \rightarrow b$ , associa-se esta etapa à expansão isotérmica, ou desce de  $c \rightarrow d$ , associa-se esta etapa à compressão isotérmica (vinculando-se ao diagrama P-V da Figura 1). Visto que esta máquina não opera com bielas, virabrequim e volante, assim diferenciando-se da versão anterior, um detalhe a esclarecer é que aí, portanto, não há qualquer volante para armazenar uma energia mecânica (energia cinética rotacional) que por inércia viabilizaria a ocorrência das duas transições isocóricas pelas quais não se realizam trabalhos.

Vale atentar ao fato de que, durante o funcionamento desta segunda versão, o tubo de ensaio oscila tipo uma gangorra com seu centro apoiado no mancal, consoante à Figura 4, estando uma extremidade do vidro<sup>13</sup> aquecida pela lamparina, e com a outra extremidade fria (próxima da temperatura ambiente). Um ponto a explorar pela Figura 4 é que, em ambas as transições isotérmicas ( $a \rightarrow b$  e  $c \rightarrow d$ ), os trabalhos realizados permitem relativas elevações das esferas que então armazenam energia potencial gravitacional, e que, em razão das inclinações do tubo pelo movimento de gangorra, também sofrem contínuas perdas dessa energia potencial ao caírem de um lado a outro. É preciso enfatizar com os alunos, ainda por subsídio da Figura 4, que nessas ligeiras quedas das esferas, tanto na etapa  $b \rightarrow c$  quanto na etapa  $d \rightarrow a$ , não há movimentação do êmbolo da seringa, e conseqüentemente, não há realização de trabalho algum por se constatar não haver variação do volume do ar (sistema), o que caracteriza ambas as etapas de transições isocóricas. Portanto, oportuniza-se aos aprendizes a percepção de que a função das esferas é tão-somente de, durante suas movimentações de um lado a outro, repentinamente deslocar grande parte do ar (sistema)<sup>14</sup>, ar ora aquecido indo para o lado frio ( $b \rightarrow c$ ) e ora esfriado indo para o lado quente ( $d \rightarrow a$ ), assim efetuando respectivas elevações de temperaturas (saltos em isotérmicas na Figura 1) com trocas de calor necessárias ao funcionamento da máquina.

<sup>13</sup> Material que não é bom condutor de calor, possibilitando diferenças de temperaturas entre as extremidades do tubo.

<sup>14</sup> Ocupando então o lugar (volume) que antes era ocupado por parte do sistema.

Enfim, o reforço pedagógico desses apontamentos por uso dessa representação figurativa (Figura 4) com os alunos faz-se contribuir à constatação do fato da energia mecânica gerada pela máquina ocorrer devido à diferença de temperatura entre os dois reservatórios (lado quente e lado frio do tubo de ensaio). Aos reservatórios de calor quente e frio, uma discussão pode ser feita atentando-se para o lado frio das máquinas, isto é, no caso da primeira versão, “parede fria” do cilindro da seringa cuja região se vê ocupada pelo ar nas transições e, na segunda versão, “parece fria” que abrange cerca de metade do tubo de ensaio somada com uma pequena porção do cilindro da seringa. Fisicamente aí, sempre uma quantidade de energia por calor que inicialmente é absorvida na expansão isotérmica de  $a \rightarrow b$  vem a ser desperdiçada ao ser liberada nessas “paredes frias” durante a compressão isotérmica de  $c \rightarrow d$ . Por assim ser, “paredes frias” essas que permanecem ligeiramente superiores à temperatura ambiente em contrassenso com o pressentimento de assim não aparentarem estar, esclarecendo a impossibilidade prática, portanto, de uma máquina térmica converter toda energia recebida por calor em trabalho.

Ademais, desse raciocínio, a equação (1) mantém-se como uma representação oficial e inteligível a esse nível escolar, em que nesta proposta não se forçou um aprofundamento com cálculos e logaritmos ao tratamento quantitativo e que poderia ultrapassar a realidade desse grau de ensino<sup>15</sup>, mas que nada impede o professor de direcionar uma apreciação qualitativa à suspeita dessas versões didáticas individualizarem baixos rendimentos térmicos. Em consideração das dificuldades e limitações reais à prática, implicando rendimentos previstos de quaisquer ciclos teóricos sempre maiores que rendimentos medidos experimentalmente, imagináveis tentativas poderiam ser: avaliar a quantidade de combustível consumida pela lamparina e a quantidade de energia desse consumo que é efetivamente fornecida ao reservatório quente, estabelecendo uma relação nesse sentido para estimar o rendimento térmico experimental da máquina; adaptar um dispositivo na máquina térmica a fim de suspender um objeto com determinada massa, em que se avalia o trabalho realizado na situação a partir da variação da energia potencial de tal elevação. Contudo, como já salientado, procedimentos quantitativos escapam do objetivo aqui ajustado pela presente proposta.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou contribuir com uma estratégia de ensino diferenciada para o diagrama  $P-V$  do ciclo Stirling reunindo duas versões simples de máquinas térmicas, e discutindo, no âmbito qualitativo e demonstrativo, sua viabilidade de aplicação com tratamento escolar de nível médio. É preciso deixar claro que, para isso e ao grau de ensino delimitado, estabeleceram-se associações aproximativas e qualitativas do funcionamento das máquinas em situação prática com a descrição teórica do diagrama  $P-V$  a que elas pertencem, tendo em

<sup>15</sup> A exemplo de como fazem SAVALL-ALEMANY *et al.* (2020) por uso da segunda versão de máquina térmica aqui empregada, em que determinam um relativo baixo rendimento da mesma ao utilizar a plataforma Arduino, constituindo uma proposta experimental quantitativa que a torna restrita apenas aos cursos de graduações e que resulta, inclusive, num ciclo de Stirling mais realista e “suavizado”, com uma área menor que o ciclo teórico estimado (Figura 1). Coerentemente a isso, Dickerson e Mottmann (2019, p. 8) afirmam que, quando se analisa quantitativamente o desempenho real de quaisquer máquinas térmicas de ciclo Stirling, é comum deparar-se com uma menor semelhança ao diagrama  $P-V$  teórico da Figura 1. Um exemplo de medição real do diagrama  $P-V$  pode ser visto em <https://youtube.com/watch?v=dvomod6SsA0>.

conta que medições reais de desempenho comumente caracterizam diagramas sem muita semelhança com o teórico discutido. Ademais, pela segunda seção deste trabalho, evitou-se aqui promover a realização imprópria de discussões pelas quais rendimentos térmicos entre os ciclos de Stirling e de Carnot seriam equivalentes, um erro específico propagado em propostas de ensino, assim constatado em Zhu e Xiang (2022, p. 3), Lu *et al.* (2018, p. 2), Assis *et al.* (2009, p. 221), e Deacon *et al.* (1994, p. 180).

De acordo com os referenciais pedagógicos utilizados, buscou-se defender a potencialidade dessa proposta por uma particular integração dos multimodos de representação cuja sequência abrange uma avaliação formativa, empregada como reforço instrucional e em cooperação à carência de efetuar tarefas de avaliação que sejam igualmente diversificadas quanto ao seu aspecto representacional (LABURÚ; SILVA, 2011a, p. 724). A proposta é compatível com “o princípio pedagógico contemporâneo, de um ensino plural em termos representacionais, que atenta para as necessidades e preferências individuais cognitivas, quando se pensa numa aprendizagem efetiva” (LABURÚ; SILVA, 2011a, p. 727), vindo até a contribuir com essa linha de pesquisa educacional pelo viés pragmático. Aliás, a partir do modo de representação figurativo e particularizado à integração multimodal dessa estratégia, delineou-se, a título de exemplo, como esse modo é capaz de se tornar eficaz para iniciar ou aprimorar a elaboração das ideias dos aprendizes acerca das características de uma máquina térmica e da interpretação de um relacionado diagrama *P-V*. Com isto, auxiliando-os a ultrapassarem obstáculos conceituais quando se restringe apenas às representações mais abstratas e tradicionais, como a diagramática e a atividade experimental.

Espera-se que a presente proposta seja uma alternativa proveitosa ao educador desse grau de ensino, em que o relacionado diagrama *P-V* esteja no interesse da instrução e pela qual ele projete demonstrar máquinas térmicas de ciclo Stirling aos alunos, de modo a beneficiar maiores compreensões durante discussões inclusive de outros ciclos termodinâmicos que, por sua vez, são inevitáveis de serem mencionados nesse contexto, como é o caso do ciclo de Carnot.

## REFERÊNCIAS

ASSIS, A.; AMORIM, C.; CARVALHO DE, F. O uso do motor Stirling no ensino da Termodinâmica: uma estratégia metodológica. **Enseñanza de las ciencias**. Número Extra. VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Barcelona, pp. 218-222 (2009). Disponível em: <<https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/293449/381976>>. Último acesso: 11 de maio de 2022.

COSTA, R. C. M.; MARTINS, E. D.; FELIX, N. M. **Avaliação institucional do ensino-aprendizagem**. 1ª Edição. Sobral: Editora Aiamis, 2017. Disponível em: <[https://md.uninta.edu.br/geral/pos-graduacao/pedagogia/avaliacao\\_institucional\\_do\\_ensino\\_aprendizagem/AVALIA%c3%87%c3%83O%20INSTITUCIONAL%20DO%20ENSINO%20APRENDIZAGEM-ACE.pdf](https://md.uninta.edu.br/geral/pos-graduacao/pedagogia/avaliacao_institucional_do_ensino_aprendizagem/AVALIA%c3%87%c3%83O%20INSTITUCIONAL%20DO%20ENSINO%20APRENDIZAGEM-ACE.pdf)>. Último acesso em 2 de agosto de 2021.

DEACON, Christopher, G.; GOULDING, C Haridanss; DE YOUNG, Brad. Demonstration experiments with a Stirling engine. **Physics Education**, v. 29, p. 180-183, 1994. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/29/3/013/pdf>. Último acesso: 17 de maio de 2022.

DICKERSON, Robert H.; MOTTMANN, Jochen. The Stirling cycle and Carnot's theorem. **European Journal Physics**, v. 40, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/ab3532/pdf>. Último acesso: 20 de maio de 2022.

DUVAL, R. **Semiosis y pensamiento humano: registros semióticos y aprendizajes intelectuales**. Universidad del Vale, Instituto de Educación y Pedagogía (Colômbia): Editora Santiago de Cali, 2004. Disponível em: <https://www.scienceopen.com/document?vid=171dcd43-7a1d-4e9e-b717-77febb4547a1>. Último acesso: 13 de junho de 2013.

FERNANDES, D. Para uma teoria da avaliação formativa. **Revista Portuguesa de Educação**, v. 19, n. 2, ps. 21-50, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/5495/1/Para%20uma%20teoria%20da%20avaliac%CC%A7a%CC%83o%20formativav19n2a03%283%29.pdf>>. Último acesso: 2 de agosto de 2021.

GASPAR, Alberto. **Física – Ondas, Óptica e Termodinâmica**. São Paulo: Editora Ática, 2000.

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. **Física – Volume 1**. São Paulo: Makron books do Brasil Editora Ltda, 1999.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física** (Gravitação, Ondas e Termodinâmica). Volume 2, 8ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009.

LABURÚ, Carlos Eduardo; SILVA, Osmar Henrique Moura da. O laboratório didático a partir da perspectiva da multimodalidade representacional. **Ciência & Educação**, v. 17, n. 3, p. 721-734, 2011a. Disponível em: <http://old.scielo.br/pdf/ciedu/v17n3/a13v17n3.pdf>. Último acesso: 13 de junho de 2022.

LABURÚ, Carlos Eduardo; SILVA, Osmar Henrique Moura da. Mutimodos e múltiplas representações: fundamentos e perspectivas semióticas para a aprendizagem de conceitos científicos. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, n. 1, p. 7-33, 2011b. Disponível em: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/244-478-1-SM%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/244-478-1-SM%20(1).pdf). Último acesso: 13 de junho de 2022.

LEE, J. F.; SEARS, F. W. **Termodinâmica**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1969.

LU, Y. J.; NAKAHARA, Hiroko; BOBOWSKI, J. S. Quantative Stirling Cycle Measurements: P-V Diagram and Refrigeration. **Science Education**, v. 4, p. 1-7, nov. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1812.04415.pdf>. Último acesso: 18 de maio de 2022.

MARTINEZ, YULY A. G.; VARGAS, YULY H. R. Enseñanza para la comprensión y trabajos prácticos: Estrategia de aula para la aproximación al ciclo de Stirling. **Revista Científica**, Edición especial, p. 69-79, enero de 2017, Bogotá, D.C. Disponível em: [https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA500224003&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=01242253&p=IFME&sw=w&userGroupName=uel\\_br](https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA500224003&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=01242253&p=IFME&sw=w&userGroupName=uel_br). Último acesso: 17 de maio de 2022.

MORTIMER, E. F.; SCOTT, P. Atividade discursiva nas salas de aula de ciências: uma ferramenta sociocultural para analisar e planejar o ensino. **Investigações em Ensino de Ciências**. V. 7, n. 3, p. 283-306, 2002. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/562-1135-1-SM.pdf>. Último acesso: 23 de agosto de 2021.

MÜLLER, André H. T.; ALVARENGA, Flávio G.; LOYOLA, Gustavo V. Estudo das primeira e segunda leis da termodinâmica com o emprego de experimentos e um motor Stirling. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 3, 2019. Disponível em: [https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo\\_ID658/v14\\_n3\\_a2019.pdf](https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID658/v14_n3_a2019.pdf). Último acesso: 20 de maio de 2022.

PEDROCHI Jr., O. Avaliação Formativa como Condutora da Prática docente. **XXI EBRAPEM** (Encontro Brasileiro de Estudantes de Pós-graduação em Educação Matemática). Pelotas – RS, 2 a 4 de novembro de 2017. Disponível em: <[https://wp.ufpel.edu.br/xxiebrapem/files/2018/10/gd8\\_osmar\\_pedrochijunior.pdf](https://wp.ufpel.edu.br/xxiebrapem/files/2018/10/gd8_osmar_pedrochijunior.pdf)>. Último acesso: 23 de agosto de 2021.

PRAIN, Vaughan.; WALDRIP, Bruce. An exploratory study of teachers' and students' use of multi-modal representations of concepts in primary science. **International Journal of Science Education**, Abingdon, v. 28, n. 15, p. 1843-1866, 2006. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500690600718294>. Último acesso: 13 de junho de 2022.

RADFORD, L.; EDWARDS, L.; ARZARELLO, F. Introduction: beyond words. **Educational Studies in Mathematics**, Dordrecht, v. 70, n. 2, p. 91-95, 2009. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Introduction.pdf>. Último acesso: 13 de junho de 2022.

SAVALL-ALEMANY, F.; ESPARZA-GARCIA, M.; ALVAREZ-HERRERO, J. F.; ROSA-CINTAS, S. Determinación del rendimiento de un motor de Stirling usando Arduino: una propuesta para la enseñanza de la termodinâmica en los cursos introductorios. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20200279, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/tbh3pMq3gBmW3yG6vCnZwfN/?format=pdf&lang=es>. Último acesso: 19 de maio de 2022.

SILVA, O. H. M.; LABURÚ, C. E. Um encaminhamento didático fundamentado na formulação de perguntas como auxílio ao processo educacional de medição. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**. V. 13, p. 195-213, 2013. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/4277-Texto%20do%20artigo%20(PDF)-13479-1-10-20160615.pdf>. Último acesso: 23 de agosto de 2021.

TYLER, Russell; PRAIN, Vaughan; PETERSON, Suzanne. Representational issues in students learning about evaporation. **Research in Science Education, Dordrecht**, v. 37, n. 3, p. 313-331, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11165-006-9028-3.pdf>. Último acesso: 13 de junho de 2022.

VICARI, MATHIAS V.; CARVALHO, ALEXANDRE T. G. O ensino da termodinâmica no ensino médio em uma abordagem investigativa desenvolvida em torno do motor de Stirling. **XXIII Simpósio Nacional de Ensino de Física – SNEF**. De 27 de janeiro a 01 de fevereiro de 2019 - Salvador – BA (2019). Disponível em: <https://www.posensinofisica.ufv.br/wp-content/uploads/2012/02/T0664-1.pdf>. Último acesso em 12 de maio de 2022.

WALKER, Jearl. The amateur scientist: A backyard version of a Stirling engine can be built with common materials. **Scientific American**, v. 262, n. 1, pp. 140-145, jan. 1990. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24996653?seq=5>. Último acesso: 6 de junho de 2022.

WANG, Kai; SANDERS, Seth R; DUBEY, Swapnil; CHOO, Fook Hoong; DUAN, Fei. Stirling cycle engines for recovering low and moderate temperature heat: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, ps. 89-108, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211630048X>. Último acesso: 28 de maio de 2022.

ZHU, Lilin; XIANG, Gang. Investigating student understanding of a heat engine: a case study of a Stirling engine. **Physics Education**, 57, 01511, jan. (2022). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/ac342b/meta>. Último acesso: 18 de maio de 2022.

## Apêndice – Disseminando alguns esclarecimentos entre o ciclo Stirling e o teorema de Carnot ao professor do Ensino Médio

Boa parte do que se discute aqui constitui uma síntese das reflexões de um recente artigo intitulado "O ciclo Stirling e o teorema de Carnot" (DICKERSON; MOTTMANN, 2019), objetivando, neste momento, contribuir com a disseminação de tais reflexões, agora sintetizadas e acrescidas de outros referenciais. A finalidade é de conscientizar e subsidiar o professor do Ensino Médio, em linguagem inteligível, para que se supere a problemática envolvida na literatura que trata de rendimentos entre os ciclos de Stirling e de Carnot. A questão a abordar pode ser mais ou menos assim problematizada: O teorema de Carnot diz que "todos os motores reversíveis operando entre temperaturas  $T_Q$  e  $T_F$  têm a mesma eficiência (ou rendimento térmico), e nenhum motor operando entre essas temperaturas pode ter eficiência maior do que esta" (KELLER *et al.*, 1999, p. 537); assim, pode então o ciclo Stirling ter a mesma eficiência que o de Carnot operando entre essas mesmas temperaturas?

Analisando o que alguns livros e artigos nas últimas décadas têm apontado é que, se considerar a adaptação de um regenerador ideal na máquina de ciclo Stirling, os cálculos do rendimento térmico resultam em  $1 - T_1/T_2$ , "que é exatamente o (rendimento térmico) do ciclo de Carnot" (LEE; SEARS, 1969, p. 495). Idealmente, um regenerador reversível atuaria, pela Figura 1, para que "o calor rejeitado de  $b \rightarrow c$  seja recuperado no processo de fornecimento de calor, entre  $d \rightarrow a$ " (ibid., p. 494). O entendimento considera que, nessas etapas isocóricas, as trocas de calor podem ocorrer por um regenerador acrescentado com qualificado grau de reversibilidade, através do qual o sistema (ou grande parte dele) é forçado a transitar: "regenerador é tipicamente uma malha porosa com uma grande capacidade térmica ...", que vem a "absorver ou liberar uma pequena quantidade de calor sem uma mudança substancial em sua temperatura" (LU *et al.*, 2018, p. 2). Em consequência, segundo Lee e Sears (1969, p. 495), usando-se um regenerador térmico ideal os cálculos são:

$$n_{\text{Stirling}} = \frac{W_{\text{liq.}}}{Q_{\text{abs.}}} = \frac{Q_{\text{abs.}} - |Q_{\text{ced.}}|}{Q_{\text{abs.}}} = \frac{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b} - |Q_{b \rightarrow c}| - |Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{a \rightarrow b}} = \frac{Q_{a \rightarrow b} - |Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{a \rightarrow b}} = \frac{W_{a \rightarrow b} - W_{c \rightarrow d}}{Q_{a \rightarrow b}}, \text{ ou seja,}$$

$$n_{\text{Stirling}} = \frac{RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} - RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}}{RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{eq. 6})^{16}$$

Uma chave para os cálculos acima é a de que  $Q_{d \rightarrow a}$  e  $Q_{b \rightarrow c}$  são numericamente iguais<sup>17</sup>, significando que ao salto de uma isotérmica a outra, e vice-versa (Figura 1), tem-se aquecimentos equivalentes por calor com sinais opostos. Deste modo, há um entendimento no qual  $Q_{d \rightarrow a}$  e  $Q_{b \rightarrow c}$  "podem ser simplesmente ignorados em todos os lugares como se estivessem desempenhando o papel de adiabáticas, ou seja,  $Q_{d \rightarrow a} = Q_{b \rightarrow c} = 0$ " (DICKERSON; MOTTMANN, 2019, p. 2). Todavia, a crítica aponta para o desaparecimento de parte da energia absorvida por calor que deveria estar no denominador da eq. 6, referente à  $Q_{d \rightarrow a}$  pela Figura 1 (e presente no denominador da eq. 1), resultando assim equivocadamente no rendimento de um ciclo de Carnot. Dickerson e Mottmann (ibid.) afirmam não saber com exatidão quando

<sup>16</sup> Em Lee e Sears (1969, p. 495) a eq. 6 aparece diretamente sem a grandeza  $n$  (número de mols), implicitamente cancelada entre numerador e denominador.

<sup>17</sup> Conforme eqs. 3, 4 e 5, com ambos os termos,  $Q_{d \rightarrow a}$  e  $|Q_{b \rightarrow c}|$ , se cancelando corretamente no numerador das eq. 1 e 6.

essa consideração imprópria surgiu, mas suspeitam que talvez isso tenha iniciado de um artigo de 1964, no qual se buscou investigar um ciclo termodinâmico simples a partir de uma explícita motivação:

Em cursos de ciências exatas ou de Física para alunos não técnicos, o tratamento da eficiência termodinâmica pode ser difícil tanto por causa das limitações técnicas dos alunos quanto pelo tempo disponível para desenvolvimento do assunto... O uso habitual do ciclo de Carnot para este propósito envolve logaritmos, cálculo e a derivação da lei adiabática dos gases, todos os quais são evitados aqui. Estudantes com 'limitações técnicas' podem realmente achar o ciclo Stirling vantajoso porque não há adiabáticas e o número de cálculos é ligeiramente reduzido, pois  $Q_{d \rightarrow a} = -Q_{b \rightarrow c}$ . (KELLY apud DICKERSON; MOTTMANN, 2019, p. 7)

Contudo, as reflexões naquela ocasião foram além. Da Figura 1, vê-se uma quantia de energia por calor  $Q_{b \rightarrow c}$  saindo e outra  $Q_{d \rightarrow a}$  entrando, e por ali Kelly (apud DICKERSON; MOTTMANN, 2019, p. 7) escreveu: "O calor extraído do gás no resfriamento isométrico... é devolvido a ele durante o aquecimento isométrico... esses processos são reversíveis se a sucessão de reservatórios é infinita...". Segundo Dickerson e Mottmann (2019), Kelly acreditava que  $Q_{b \rightarrow c}$  poderia retornar ao gás ideal do ciclo, então rotulado como  $Q_{d \rightarrow a}$  pela Figura 1, sendo numericamente iguais, e aí "Kelly simplesmente os ignorou e nenhum deles foi considerado nas contas de energias por calor em  $Q_{\text{absorvido}}$  ou em  $Q_{\text{cedido}}$  (forçando as isocóricas a assumirem o papel de adiabáticas). Kelly não explicou como  $Q_{b \rightarrow c}$  poderia ser convertido em  $Q_{d \rightarrow a}$ ". Logo, ignorando-se por completo as energias por calor  $Q_{d \rightarrow a}$  e  $Q_{b \rightarrow c}$  entre os respectivos volumes mínimo e máximo, excluindo inadequadamente  $Q_{d \rightarrow a}$  da energia total por calor absorvida  $Q_{\text{absorvido}}$  ( $Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}$ ), os cálculos para o rendimento térmico do ciclo Stirling implicam na eq. 6, que pode ser assim descrita:

$$n_{\text{Kelly}} = \frac{Q_{a \rightarrow b} - |Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{a \rightarrow b}} = 1 - \frac{|Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{a \rightarrow b}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = n_{\text{Carnot}} \quad (\text{eq. 6})$$

Alertam Dickerson e Mottmann (2019) que a equação 6 é incorreta com base no teorema de Carnot e ao se calcular a eficiência do ciclo de Stirling reversível corretamente, conforme a eq. 1. Ressaltam eles que o teorema de Carnot não é bem interpretado em suas variadas formas e "quando compreendido corretamente em sua 'forma forte', o teorema de Carnot impede qualquer outro ciclo reversível de corresponder à eficiência de um ciclo de Carnot ao operar no sentido horário entre os mesmos dois extremos de temperatura" (ibid., p 2).

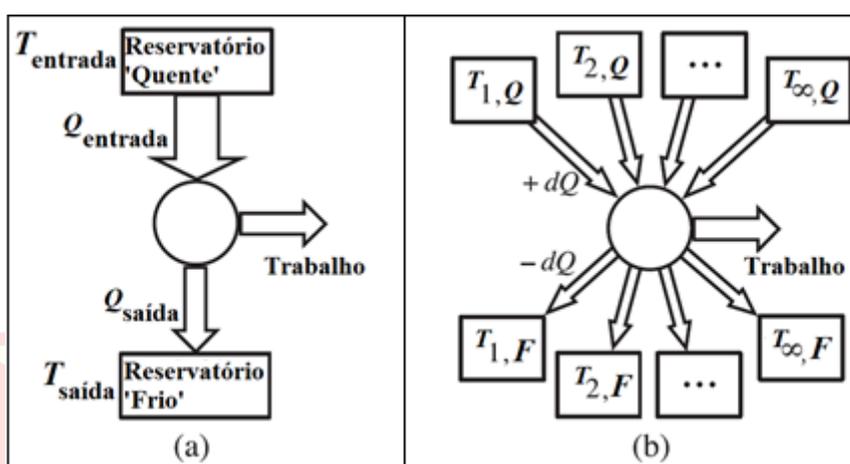
Visto diferenciar as eqs. 6 e 1 pela energia por calor da etapa  $d \rightarrow a$  que não aparece no denominador da eq. 6, já pela eq. 1<sup>18</sup>, os cálculos procedentes ao rendimento térmico de um ciclo de Stirling ideal, seguindo a representação da Figura 1, resultam em:

$$n_{\text{Stirling}} = \frac{W_{\text{líq.}}}{Q_{\text{absorvido}}} = \frac{nRT_Q \ln \frac{V_b}{V_a} - nRT_F \ln \frac{V_b}{V_a}}{nc_v(T_Q - T_F) + nRT_Q \ln \frac{V_b}{V_a}} = \frac{R(T_Q - T_F) \ln \frac{V_b}{V_a}}{c_v(T_Q - T_F) + RT_Q \ln \frac{V_b}{V_a}} \quad (\text{eq. 9})^{19}$$

<sup>18</sup>  $n_{\text{Stirling}} = \frac{W_{\text{líq.}}}{Q_{\text{absorvido}}} = \frac{Q_{\text{absorvido}} - |Q_{\text{cedido}}|}{Q_{\text{absorvido}}} = \frac{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b} - |Q_{b \rightarrow c}| - |Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}} = \frac{Q_{a \rightarrow b} - |Q_{c \rightarrow d}|}{Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}}$  (eq. 1). Considerando que:  $Q_{d \rightarrow a} = nc_v(T_Q - T_F)$  (eq. 3);  $Q_{a \rightarrow b} = W_{a \rightarrow b} = \int_{V_a}^{V_b} p \cdot dV = \int_{V_a}^{V_b} \frac{nRT_Q}{V} \cdot dV = nRT_Q \ln \frac{V_b}{V_a}$  (eq. 7);  $Q_{b \rightarrow c} = nc_v(T_F - T_Q)$  (eq. 4);  $Q_{c \rightarrow d} = W_{c \rightarrow d} = \int_{V_b}^{V_a} p \cdot dV = \int_{V_b}^{V_a} \frac{nRT_F}{V} \cdot dV = nRT_F \ln \frac{V_a}{V_b} = -nRT_F \ln \frac{V_b}{V_a}$  (eq. 8).

<sup>19</sup> SAVALL-ALEMANY *et al.* (2020, p. 6).

Fica assim evidenciado que o rendimento térmico ideal caracterizado na eq. 9 difere e é menor que o rendimento de Carnot que se nota na eq. 6, definitivamente pela razão da energia por calor adicional  $Q_{d \rightarrow a}$  que não pode ser simplesmente desprezada, senão remover-se-iam as contribuições de processos isocóricos (como se fossem 'adiabáticos') do referido ciclo de Stirling. Nessa comparação, cabe analisar que o tradicional fluxograma da Figura 5a torna-se óbvio à validade apenas para ciclos com dois reservatórios de calor, o que restringe unicamente ao ciclo de Carnot.



**Figura 5:** Diagramas de fluxo de energia: a) Uma representação típica para um ciclo de Carnot reversível operando entre únicos dois reservatórios de calor; b) Uma representação típica "realista" para um ciclo reversível quase-estático, em que há um número infinito de reservatórios quentes (Q) em distintas temperaturas, cada um fornecendo uma quantia infinitesimal  $dQ$  para a substância de trabalho, necessários para fornecer a totalidade da energia  $Q_{entrada}$ . Uma similar disposição de reservatórios frios (F) faz-se igualmente necessária à absorção da totalidade de energia  $Q_{saída}$

Fonte: Dickerson e Mottmann (2019, p. 6).

Pela Figura 5b, por mais fisicamente irreal que se questione tal configuração, um número infinito de reservatórios de calor é um requisito inescapável para quaisquer ciclos reversíveis que não sejam o de Carnot. É possível conceber que esse número infinito de reservatórios mostra-se perfeitamente organizado, caso contrário, isto é, se algum reservatório estivesse fora da ordem de temperatura adequada, a absorção ou ejeção de energia por calor ocorreria numa faixa finita de temperatura, e o ciclo tornar-se-ia irreversível<sup>20</sup>. Por sinal, enfatizam Dickerson e Mottmann (2019, p. 6): "O que é intrigante é que tal diagrama de fluxo de energia (Figura. 5a) também é apresentado quando ciclos reversíveis diferentes de Carnot estão em discussão. Isso pode ser enganoso ou pelo menos tornar-se confuso". As condições do diagrama do fluxo de energia da Figura 5a não são um problema para um ciclo de Carnot, o que o torna único pelos processos de trabalhos adiabáticos que levam o sistema à temperatura de cada reservatório e, então, todas as trocas de energia por calor que ocorrem nos

<sup>20</sup> Tal situação vem a ser "puramente uma abstração ideal, extremamente útil..., mas bastante desprovido de realidade" (ZEMANSKY apud DICKERSON; MOTTMANN, 2019, p. 5). Todavia, embora desprovidos de realidade, os ciclos reversíveis requerem uma infinidade de reservatórios, e ainda assim a literatura é carente de representações semelhantes à da Figura 5b (DICKERSON; MOTTMANN, 2019, p. 5).

reservatórios são por isotérmicas. “É a única combinação de adiabáticas e isotérmicas que possui essa propriedade. Todos os outros ciclos devem ser inerentemente irreversíveis, mas ainda quase-estáticos, visto serem necessárias trocas de energia por calor sobre diferenças finitas de temperatura” (ibid., p. 4). Numa consideração ideal de ciclos reversíveis que inclui o ciclo Stirling, portanto, o rendimento térmico de quaisquer ciclos deve ser sempre menor que a de um ciclo de Carnot, característica esta para qualquer máquina reversível não-Carnot.

À curiosidade, Dickerson e Mottmann (2019, p. 8) avaliam que a lógica empregada por Kelly se tornou amplamente aceita, razão pela qual muitos vieram a aderir que  $n_{\text{Stirling}} = n_{\text{Carnot}}$ . Citam os autores Halliday, Resnick e Walker, com uma análise similar de um ciclo Stirling na 4ª edição do livro deles, onde não há menção às energias por calor das isocóricas do ciclo: “Não apenas essas energias por calor das isocóricas são simplesmente ignoradas sem comentários, eles (autores do livro) também não as indicam no diagrama  $P$ - $V$  do ciclo Stirling, embora  $Q_{a \rightarrow b}$  e  $Q_{c \rightarrow d}$  o sejam” (ibid.). Da forma como está nesta 4ª edição do livro, Dickerson e Mottmann (2019, p. 8) afirmam que é necessário ler a legenda da figura associada, prestando atenção ao que se escreve entre parênteses para descobrir o que os autores do livro supõem: “... energia térmica (calor) é armazenada em uma seção do motor, muitas vezes em uma malha de metal”. Dickerson e Mottmann (2019, p. 8) comentam que “é importante deixar claro a distinção entre dispositivos mecânicos práticos e ciclos termodinâmicos teóricos idealizados”, e questionam como qualquer objeto real (como uma malha metálica) pode fazer parte de um problema teórico em termodinâmica empregando um gás ideal.

Suspeitando que os autores do livro buscassem simplificar a discussão para chegar a uma resposta ‘aparentemente correta’<sup>21</sup> por adesão do conceito de uma malha de metal erroneamente emprestado de motores Stirling em funcionamento real, Dickerson e Mottmann (2019) comentam terem escrito para Halliday, Resnick e Walker, caracterizando a séria fraqueza em seu livro. Segundo Dickerson e Mottmann (2019, p. 8), “esses autores investigaram a questão mais a fundo e reconheceram seu erro, concordando que o ciclo de Stirling não poderia ter a mesma eficiência que um ciclo de Carnot”, e admitiram, felizmente, e a partir da 6ª edição do mesmo livro didático, “Sadi Carnot sendo restaurado a uma posição de honra”; mencionam agora o ciclo de Stirling, “mas apenas para salientar que sua eficiência é menor que a de um ciclo de Carnot” em termos teóricos<sup>22</sup>. Enfim,

... para o ciclo de Stirling (Figura 1), tudo o que se sabe, e de fato tudo o que pode ser conhecido, é que  $Q_{\text{absorvido}} = Q_{d \rightarrow a} + Q_{a \rightarrow b}$  e  $Q_{\text{rejeitado}} = Q_{b \rightarrow c} + Q_{c \rightarrow d}$ . O ponto crucial: toda e qualquer contribuição para  $Q_{\text{absorvido}}$  e para  $Q_{\text{rejeitado}}$  deve ser sempre incluída de forma cuidadosa e consistente. O que está claro é que  $Q_{d \rightarrow a}$  e  $Q_{a \rightarrow b}$  do ciclo de Stirling, quando incorporados corretamente, resultam em uma eficiência inequívoca dada pela eq. 1 (ou eq. 9), uma eficiência que está de acordo com o teorema de Carnot. (DICKERSON; MOTTMANN, 2019, p. 10).

<sup>21</sup> Um ciclo Stirling reversível ter o mesmo rendimento térmico que o de Carnot.

<sup>22</sup> O rendimento apresentado na eq. 6 ( $1 - \frac{T_1}{T_2} = n_{\text{Carnot}}$ ) “... não se aplica a todas as máquinas ideais, mas somente às que funcionam segundo um ciclo de Carnot” e, além disso, “... máquinas de Stirling reais possuem uma eficiência ainda menor (que teoricamente)” (HALLIDAY *et al.*, 2009, p. 258).