



Sérgio Moacir Job Lima

**ENSINANDO TERMODINÂMICA E MECÂNICA ESTATÍSTICA: ESTIMATIVAS
PARA O RENDIMENTO DOS MOTORES DE CICLO OTTO.**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a Sociedade Brasileira de Física, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Orientador

Prof. Dr. Ederson Staudt

Coorientador

Tramandaí

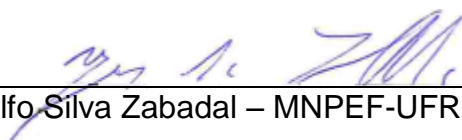
Março de 2019

Sérgio Moacir Job Lima

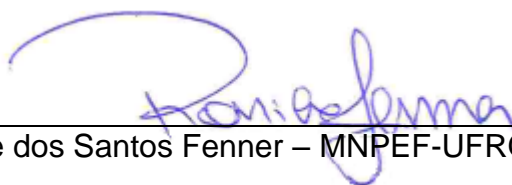
**ENSINANDO TERMODINÂMICA E MECÂNICA ESTATÍSTICA: ESTIMATIVAS
PARA O RENDIMENTO DOS MOTORES DE CICLO OTTO.**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a Sociedade Brasileira de Física, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 22 de março de 2019.



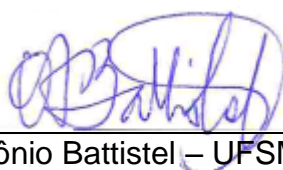
Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal – MNPEF-UFRGS/CLN (Orientador)



Prof. Dr. Roniere dos Santos Fenner – MNPEF-UFRGS/CLN



Prof.^a Dra. Karen Cavalcanti Tauceda – MNPEF-UFRGS/CLN



Prof. Dr. Orimar Antônio Battistel – UFSM – Departamento de Física

CIP - Catalogação na Publicação

Lima, Sérgio Moacir Job
Ensinando termodinâmica e mecânica estatística:
Estimativas para o rendimento dos motores de ciclo
Otto. / Sérgio Moacir Job Lima. -- 2019.
68 f.
Orientador: Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal.

Coorientador: Dr. Ederson Staudt.

Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, Campus Litoral Norte,
Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional
Profissional em Ensino de Física, Tramandaí, BR-RS,
2019.

1. Termodinâmica do ciclo Otto. 2. Rendimento de
motores. 3. Mecânica estatística. 4. Modelo matemático
geométrico e colisional . 5. Funcionamento de motores.
I. Zabadal, Dr. Jorge Rodolfo Silva, orient. II.
Staudt, Dr. Ederson, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro por meio da bolsa concedida e a Ana Paula Goulart Schultz, a pessoa que me incentivou a continuar disputando o Mestrado apesar das vicissitudes inerentes a qualquer atividade que exija formação. Também sou grato aos meus orientadores, Professores Zabadal e Ederson, por serem incansáveis na busca pelo verdadeiro aprendizado de uma forma agradável e inovadora, sempre aproveitando o conhecimento que trazemos em nossa bagagem de vida. Tenho também profunda estima e gratidão ao Professor Anderson Hoffmeister, visionário e amante da educação, foi determinante para que o polo da UFRGS/CLN fizesse parte de Tramandaí.

RESUMO

Embora a Mecânica Estatística constitua o pré-requisito fundamental da Termodinâmica, esse assunto é introduzido de forma bastante formal. Como consequência, alguns tópicos interessantes em Fenômenos de Transporte e Química permanecem restritos a especialistas nessas áreas. No trabalho proposto, um modelo matemático relativamente simples é utilizado para introduzir a Mecânica Estatística em cursos de graduação e no ensino médio. Esse modelo é empregado para explicar o baixo rendimento do motor ciclo Otto. Resultados numéricos são apresentados.

Palavras-chave: *mecânica estatística_1; motores_2; rendimento_3.*

ABSTRACT

Although Statistical Mechanics constitutes the foundation of Thermodynamics, this subject is introduced in a very formal way. Thus, some interesting topics in Chemistry and Transport Phenomena remain restricted to specialists. In this work, a simple mathematical formulation is employed to introduce Statistical Mechanics in undergraduate courses and even in high school. This model is employed to justify the low efficiency of the Otto-cycle engines. Numerical results are reported.

Keywords: Statistical Mechanics _1; engines_2; efficiency_3..

SUMÁRIO

1	Introdução: da mecânica estatística no ensino médio: Abordagens de Feynman e Landau	8
2	Revisão da literatura	11
3	Referencial Teórico.....	20
4	Fatores que afetam o rendimento do motor Otto segundo os profissionais da mecânica automotiva	23
4.1	Limitações aos argumentos qualitativos	24
4.2	A necessidade do emprego de modelos matemáticos ao invés de argumentos quantitativos	24
5	Limitações conceituais e práticas da Termodinâmica Clássica	26
5.1	A Temperatura como medida da dispersão de distribuições espectrais	28
5.1.1	Inconsistências geradas ao ignorar o espectro de radiação	29
6	Subsídios básicos para a formulação do modelo matemático	32
7	Modelo matemático simplificado para estimar o rendimento do motor	37
8	Refinamento do modelo proposto.....	40
9	Relato de experiências.....	44
10	Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.....	51
11	Bibliografia	53
	Apêndice A – Produto educacional	54

Introdução: da mecânica estatística no ensino médio: Abordagens de Feynman e Landau.

1 – Introdução

A introdução de temas avançados no ensino médio, quando efetuada de forma relativamente acessível, bastante realista e logicamente encadeada, constitui um recurso importante não apenas para inculcar de forma natural o gosto pela pesquisa, mas também para desmistificar temas que poderiam vir a intimidar o aluno. Entretanto, quando a introdução desses temas é conduzida de maneira excessivamente idealizada e dogmática, pode dificultar até mesmo a compreensão de outros tópicos relativamente simples.

A fim de elucidar o argumento, basta tomar como exemplo o ensino de modelos atômicos, onde duas concepções diametralmente opostas são utilizadas em conjunto para resolver exercícios em sala de aula: o modelo planetário de Bohr e o modelo ondulatório de Schroedinger. Considerar que a camada L é composta por orbitais s e p, na melhor das hipóteses, induz o aluno a um erro conceitual primário. O conceito de camada, oriundo do modelo de Bohr, é totalmente incompatível com a concepção de orbitais atômicos, que surgem na teoria de Schroedinger. No primeiro caso, considera-se o elétron como uma partícula puntual massiva que orbita o núcleo do átomo. No segundo, a eletrosfera é tratada como um campo difuso, tal como uma nuvem de densidade variável, sendo os orbitais s e p soluções de uma equação diferencial potencial-difusiva.

Além de absorver e tentar conciliar informações inconsistentes, o aluno se vê obrigado a aceitar regras infundadas, tais como a do octeto, que é violada na prática com grande frequência. Por exemplo, o Magnésio presente na molécula da clorofila forma quatro ligações com átomos de Nitrogênio, quando a valência prevista pela regra do octeto é dois. Além disso, dois dos chamados gases nobres, o Kriptônio e o Xenônio, formam compostos nos quais figuram como halogênios: os perxenonatos e os perkriptonatos de sódio e potássio.

Como consequência dessa estratégia de ensino, na qual o acúmulo de informações tem precedência sobre o encadeamento lógico das ideias, e até mesmo

sobre as próprias evidências experimentais, pouco resta ao aluno a não ser se resignar a acumular informações questionáveis, e então prestar contas sobre essas mesmas informações em provas e exames finais. Nesse cenário, o aluno considerado competente é aquele que simplesmente memoriza informações, por mais obscuras e incoerentes que possam se mostrar.

Uma forma relativamente eficaz de amenizar essa situação consiste em introduzir os chamados problemas abertos, questões para as quais o enunciado se apresenta intencionalmente incompleto, para que o aluno participe de forma mais ativa tanto na sua formulação quanto no próprio processo de resolução. Essas questões exigem do aluno um esforço consciente para buscar informações subsidiárias, sem as quais não podem ser obtidas soluções.

Muitas vezes a busca por essas informações constitui uma tarefa mais importante do que a própria resolução do problema originalmente proposto. Isso ocorre à medida que os cenários físicos descritos no problema se tornam progressivamente mais complexos e realistas. Em geral, quanto mais realista o problema a tratar, mais flexível o aluno pode vir a se tornar, na tentativa de obter informações subsidiárias. Isto ocorre porque, ao descobrir que diferentes subsídios podem conduzir a várias soluções aceitáveis, o aluno se torna consciente de que não existe “a resposta certa”, mas um espectro amplo de possibilidades a explorar. Contudo, essa flexibilidade só pode ser amplamente explorada se as premissas e modelos obtidos a título de subsídio estiverem de fato presentes na literatura, e além disso não constituam hipóteses e modelos demasiadamente idealizados, a exemplo dos casos já mencionados. Essa limitação constitui o ponto mais vulnerável da estratégia de introdução de questões abertas.

Infelizmente, existe uma série de problemas onde o enunciado parece conter todas as informações necessárias para a obtenção de soluções, mas as próprias soluções obtidas se revelam inadequadas para descrever cenários realistas. Para muitos desses problemas, existem informações subsidiárias questionáveis, que em geral resultam em modelos muito simplificados, que por sua vez fornecem soluções insatisfatórias. Nesse caso, a busca de novas informações subsidiárias passa a constituir a tarefa mais complexa e meritória do processo de obtenção de soluções. Como exemplo, o cálculo da entalpia de reações químicas exige o conhecimento prévio dos respectivos produtos de reação. Contudo, o processo de obtenção desse

subsídio exige um esforço muito maior do que o requerido para o próprio cálculo da entalpia de reação.

No cálculo da entalpia de reação, tema que supostamente deveria ser esgotado no âmbito da Termodinâmica, o pré-requisito relativo aos produtos de reação é encontrado, de forma indireta, na Física Quântica. Ocorre que as conexões entre essas áreas são exploradas de forma superficial na literatura.

Embora esses problemas ocorram com frequência em diversas áreas da Física e da Matemática, os cursos formais continuam tratando suas respectivas áreas como independentes e autossuficientes, ignorando o fato de que as conexões entre os temas abordados são tão importantes quanto os próprios tópicos ministrados.

No que se refere à abordagem adotada para estimar o rendimento de motores ciclo Otto, cabe aqui uma ressalva fundamental do ponto de vista pedagógico. Ainda que o formalismo da Mecânica Estatística seja inacessível aos alunos do ensino médio, a ideia básica subjacente ao modelo matemático utilizado no trabalho pode ser facilmente compreendida pelo público em geral. Embora o modelo tenha sido concebido originalmente a partir da equação de Liouville e da distribuição de energia para o ensemble canônico, os argumentos apresentados ao longo deste trabalho são de natureza essencialmente colisional.

O trabalho proposto trata de um tópico pertencente a essa classe de problemas, e que está relacionado a um tema de interesse comum no cotidiano da população em geral: o funcionamento do motor ciclo Otto e as razões pelas quais seu rendimento é extremamente baixo. Nesse motor, pouco mais de 20% da energia gerada pela combustão da gasolina é efetivamente utilizada para produzir movimento. Ocorre que mais de 60% dessa energia é transferida para a água de refrigeração, sendo o restante dissipado por atrito entre peças móveis, ou lançado pelo cano de descarga em forma de produtos de combustão (gases aquecidos).

O presente trabalho é sumarizado da seguinte forma: o capítulo 2 mostra a revisão da literatura, o capítulo 3 o referencial teórico, baseado nas ideias de Feynman e Landau. O capítulo 4 apresenta o resultado de uma pesquisa informal junto aos profissionais da mecânica automotiva, que fornecem opiniões diversas sobre os principais fatores que influenciam o rendimento dos motores ciclo Otto. O

capítulo 5 mostra as limitações da Termodinâmica Clássica em fornecer subsídios confiáveis para estimar o rendimento de motores de combustão. O capítulo 6 fornece subsídios qualitativos para a formulação de um modelo matemático preliminar. O capítulo 7 mostra a formulação desse modelo simplificado, que resulta em uma expressão bastante simples para estimar o rendimento dos motores ciclo Otto. No capítulo 8 o modelo preliminar sofre um pequeno refinamento, que produz uma estimativa mais acurada para o rendimento do motor, o 9 um relato de experiências e o capítulo 10 encerra a dissertação, resumizando conclusões e fornecendo recomendações para futuros trabalhos.

2 Revisão da Literatura

Com vistas da possibilidade do uso deste material por parte dos professores que ministram aspectos de termodinâmica em suas aulas, é necessário situar o leitor quanto ao tratamento conceitual dado no que se refere as máquinas térmicas naquilo que, muitas vezes, é a principal fonte de consulta para preparo das aulas por parte do professor: o livro didático (PNLD, 2019). Além disso, o livro didático é também, em alguns casos, o principal material, sobre determinado assunto, de acesso para o aprendiz.

Como aqui não se trata de análise dos livros didáticos, o leitor mais interessado nesse assunto, é remetido as referências (Vieira, 2013), (Moraes, 20011), (Ferreira,) e (dos Reis, 2015), para um maior aprofundamento.

Tendo em mente o alcance do ensino-aprendizado consciente de conceitos para que se torne possível fazer a leitura do mundo real, faz-se interessante verificar como a termodinâmica clássica é considerada nos livros didáticos. Tem-se nisso o objetivo principal o de considerar um aspecto crucial: o tratamento de motores a combustão. Para isso faremos uma breve, porém contundente, revisão da maneira como os livros didáticos utilizados em diferentes níveis de escolarização apresentam o tema.

Não pretendemos apresentar uma revisão da apresentação da termodinâmica em todos os seus aspectos conceituais, como usualmente se procede nos livros didáticos, focalizaremos apenas nos conceitos que são essenciais ao presente trabalho.

Como norteador da presente revisão lembramos do posicionamento de Mário Schönberg quando este argumenta, em relação aos livros (Schönberg, pg. 142):

Outra questão que deve ser repensada é a dos livros. Deve-se procurar estudar em livros escritos por grandes cientistas. Os livros didáticos, em geral de autores norte-americanos, contêm informações esgotadas. O conceito científico é uma ideia viva, tem uma certa dinâmica própria, impossível de ser passada através dos livros didáticos. Acresce ainda que, frequentemente, eles contam a História da Ciência de forma errada.

Deste modo, começaremos com um autor que possuiu importantes contribuições originais ao campo de conhecimento da Física tendo recebido o Prêmio Nobel no ano de 1945: Wolfgang Pauli. Em seu livro: Termodinâmica e Teoria Cinética dos Gases (vol. 3 das lições de Física de Pauli) começa o capítulo 1- conceitos básicos e primeira lei, em seu primeiro parágrafo afirmando (Pauli pg.1):

A Termodinâmica Clássica renuncia cenários detalhados e, portanto, efetua apenas afirmações gerais relacionadas a energia das transferências de calor.

Assim, tendo em vista a ausência de cenários detalhados se poderia perguntar qual a consequência disso quando se envereda para cenários reais. Pretendemos esclarecer esse aspecto adiante.

Na consideração mais adiante, W. Pauli define o ciclo de Carnot como (Pauli, pg18):

O ciclo de Carnot é um processo quase estático (infinitamente lento). Ele consiste de dois processos adiabáticos ($dQ=0$) e dois processos isotérmicos ($dt=0$). Visto que processos quase estáticos são reversíveis, portanto o ciclo de Carnot também é reversível.

Ressaltamos que o mais importante dessa consideração é o caráter de reversibilidade do processo de Carnot, tendo em vista que terá conexão direta com a consideração dos motores a combustão.

Dando prosseguimento, visitamos a obra de Arnold Sommerfeld (que, dentre outros, foi o orientador de doutorado do próprio Wolfgang Pauli) que, depois de mais de quarenta anos de ensino acadêmico e inúmeras contribuições originais, publicou uma série de livros compondo um “Curso de Física Teórica”. Em seu volume V – Termodinâmica e Mecânica Estatística, sobre os processos reversíveis e irreversíveis escreve (Sommerfeld, pg.19):

Processos reversíveis não são de fato, processos como um todo, são sequências de estados de equilíbrio. Os processos que nós encontramos na vida real são sempre processos irreversíveis, processos durante os quais o equilíbrio perturbado é equalizado.

E continua dizendo (Sommerfeld, pg.19):

A despeito deles não serem reais, processos irreversíveis são os mais importantes na termodinâmica pelo fato de que uma equação definida pode ser obtida considerando apenas mudanças reversíveis; mudanças irreversíveis podem somente ser descritas com a ajuda de desigualdades quando a termodinâmica de equilíbrio é utilizada.

Percebe-se que, mesmo para autores consagrados, em alguns pontos, fica evidente a demasiada importância de métodos que são meras combinações de palavras em detrimento da descrição de processos reais, o que certamente envolveria a necessidade de descrição em termos de equações matemáticas.

Na pag. 28 Sommerfeld ainda estabelece a equação para o cálculo da eficiência em um ciclo de Carnot, para uma máquina que opera por meio de um fluido arbitrário, porém homogêneo obtendo:

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2},$$

e afirma (Sommerfeld, pg.28):

Carnot considerou uma máquina **E** que realiza os processos 1 2 3 4 infinitamente lento (sem atrito ou perdas por radiação) de modo que o fluido operante está sempre em equilíbrio térmico. (Em tal caso a isentrópica precisa ser qualitativamente a mesma da descrita na seção 5 em conexão com o caso especial do gás ideal). Tal máquina é denominada reversível.

Quando Sommerfeld se refere aos processos 1 2 3 4 ele está se referindo a Fig. 1 abaixo.

Fig. 1 – Representação no diagrama PV dos ciclos de Carnot (Sommerfeld, pg.28).

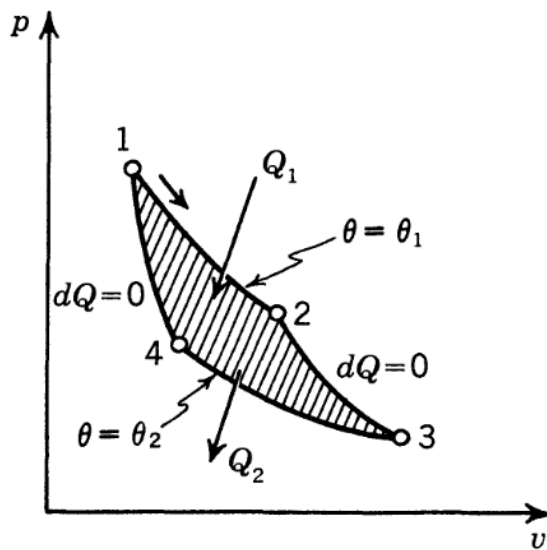


Fig. 5.
The Carnot cycle.

E, ainda considera o rendimento de uma máquina a diesel quando escreve (Sommerfeld, pg. 37):

Uma máquina a diesel (temperatura de ignição de 400 C) opera em uma diferença de temperatura mais larga do que uma usina a vapor e possui uma eficiência ideal maior. Nós relembramos aqui que a eficiência de um ciclo a diesel não pode ser diretamente inferida a partir do ciclo de Carnot pelo fato de que os diagramas indicadores diferirem demasiadamente do último.

Aqui fica evidente algumas das consequências possíveis quando se tenta utilizar modelos demasiadamente idealizados para descrever processos reais. O cenário ainda é agravado quando o processo real viola explicitamente hipóteses adotadas para estabelecer os modelos idealizados, com o é o caso do cálculo do rendimento dos motores a combustão por meio da termodinâmica do equilíbrio. O resultado é a falta de precisão da previsão de modelos demasiadamente idealizados em comparação com dados experimentalmente verificáveis.

Consideraremos agora os escritos de Max K. E. L., prêmio Nobel de Física 1918, quem em seu livro "Treatise on Thermodynamics"¹ dedica seção para tratamento detalhando de algumas suposições da Termodinâmica (Planck pg. 52):

Importância teórica especial precisa ser dedicada aqueles processos que ocorrem de maneira infinitamente lenta e, portanto, consistem de uma sucessão de estados de equilíbrio. Rigorosamente falando, esta expressão é vaga, visto que um processo pressupõe mudanças e, por isso, distúrbios do equilíbrio. Mas onde o tempo é tomado como imaterial, e o resultado do processo sem consequência, estes distúrbios podem ser tomados pequenos tanto quanto queremos, certamente muito pequenos em comparação com as outras

quantidades que caracterizam o estado do sistema em observação. Assim, um gás pode ser comprimido muito vagarosamente para qualquer fração de seu volume inicial, fazendo a pressão externa, em cada momento, apenas um pouco maior do que a pressão interna do gás. Onde a pressão externa entra, por exemplo, no cálculo do trabalho de compressão, em erro muito pequeno será então cometido, se a pressão do gás for substituída pela pressão externa. Passando para o limite, o resultado obtido se torna rigorosamente exato para compressões infinitamente lentas.

Isso se mantém para compressão em pressão constante bem como variável. Esta última será dada requerendo o valor em cada momento pela adição ou remoção de pequenos pesos. Isso pode ser feito tanto à mão (empurrando os pesos para o lado na direção horizontal), ou por algum dispositivo automático que atua apenas como mero lançador e, portanto, não contribui em favor do trabalho realizado.

A condução do calor para e de um sistema pode ser tratado da mesma maneira. Quando não é uma questão de tempo, mas apenas da quantidade de calor recebida ou cedida por um sistema, é suficiente, de acordo com calor adicionado ou tomado de um sistema, conecta-lo com um reservatório de calor com temperatura levemente superior ou inferior da do sistema. Essa pequena diferença serve, meramente, para determinar em qual direção do fluxo do calor, enquanto que a sua magnitude é negligenciada se comparada com as mudanças no sistema, que resultam dos processos. Nós, portanto, falamos da condução de calor entre corpos com igual temperatura, assim como falamos da compressão de um gás pela pressão externa igual à da do gás. Isso meramente antecipa o resultado da passagem para o limite a partir de uma diferença finita pequena para uma diferença infinitesimal de temperatura entre dois corpos. Isso não se aplica apenas a processos estritamente isotérmicos, mas também a aqueles com temperatura variável. Um reservatório de calor a temperatura constante será suficiente para realizar o último processo.

Apesar das ideias bem conectadas numa retórica bem organizada percebemos a falta de cálculos reais onde essa retórica possa ser colocada a prova.

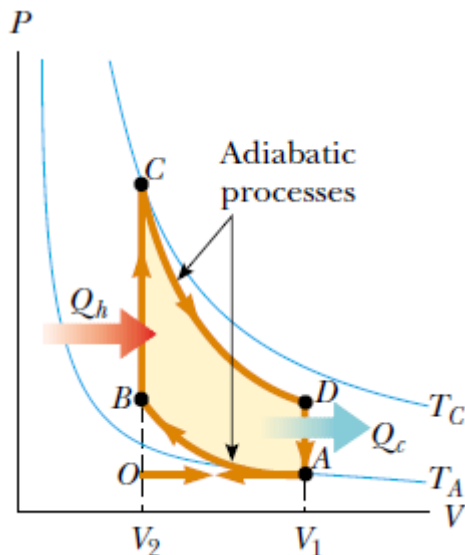
Vejamos como nos livros, muitos dos quais são de uso frequente em cursos de graduação no Brasil, são apresentados os temas de interesse.

Na pag. 191 Jewett traz um quadro onde com uma orientação interessante (Jewett, pg. 191):

Prevenção de armadilhas 8.3: não compre uma máquina de Carnot – A máquina de Carnot é uma idealização; não espere que ela seja desenvolvida para usos comerciais. Exploramos essa máquina somente para considerações teóricas.

Entretanto, na pg. 195, quando o mesmo autor considera os motores a gasolina e a diesel escrevendo: “Os processos no ciclo (dos motores a gasolina) podem ser aproximados pelo ciclo de Otto mostrado no diagrama PV na figura ativa 8.10”. A figura ativa 8.10 é reproduzida na fig. 1 abaixo.

Fig. 2 - Figura ativa 8.10 de Jewett, pg.195.



Fonte Jewett, pg.195.

Seguem-se então as considerações da explicação de todos os processos que culminam com o autor afirmando: “Se supusermos que a mistura ar-combustível é um gás ideal, a eficiência do ciclo Otto é:

$$e = 1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma-1}}$$

Continua com:

...para uma proporção de compressão típica de 8 e com $\gamma=1.4$ a equação prevê uma eficiência teórica de 56% para um motor operando no ciclo Otto idealizado. Esse valor é muito maior do que o alcançado em máquinas reais (15% a 20%) por causa de efeitos como atrito, transferência de energia por condução pelas paredes do cilindro e combustão incompleta da mistura ar combustível.

Na sequência apresenta uma justificativa para o maior rendimento dos motores a diesel:

Motores a diesel são mais eficientes que os motores a gasolina por causa da maior proporção de compressão e das temperaturas mais altas resultantes de combustão.

Em outro livro de uso bastante comum, Tipler no capítulo 19, seção 19.1 que possui como título “máquinas térmicas e a segunda lei da termodinâmica, escreve (Tipler, pg. 638):

Uma máquina térmica é um dispositivo cíclico cujo objetivo é converter a maior quantidade possível de calor em trabalho. Máquinas térmicas contêm uma substância de trabalho (água, em uma máquina a vapor) que absorve uma quantidade de calor Q_d de um reservatório de alta temperatura, realiza trabalho sobre o ambiente e libera calor Q_f enquanto retorna para o seu estado inicial, onde Q_d , W e Q_f representam magnitudes e nunca são negativos.

Em seguida trata das máquinas a vapor e posteriormente coloca: “a Figura 19-2 é um diagrama esquemático da máquina térmica usada em muitos automóveis – o motor a combustão interna.

Fig. 3 – Reprodução da Figura 19-2.

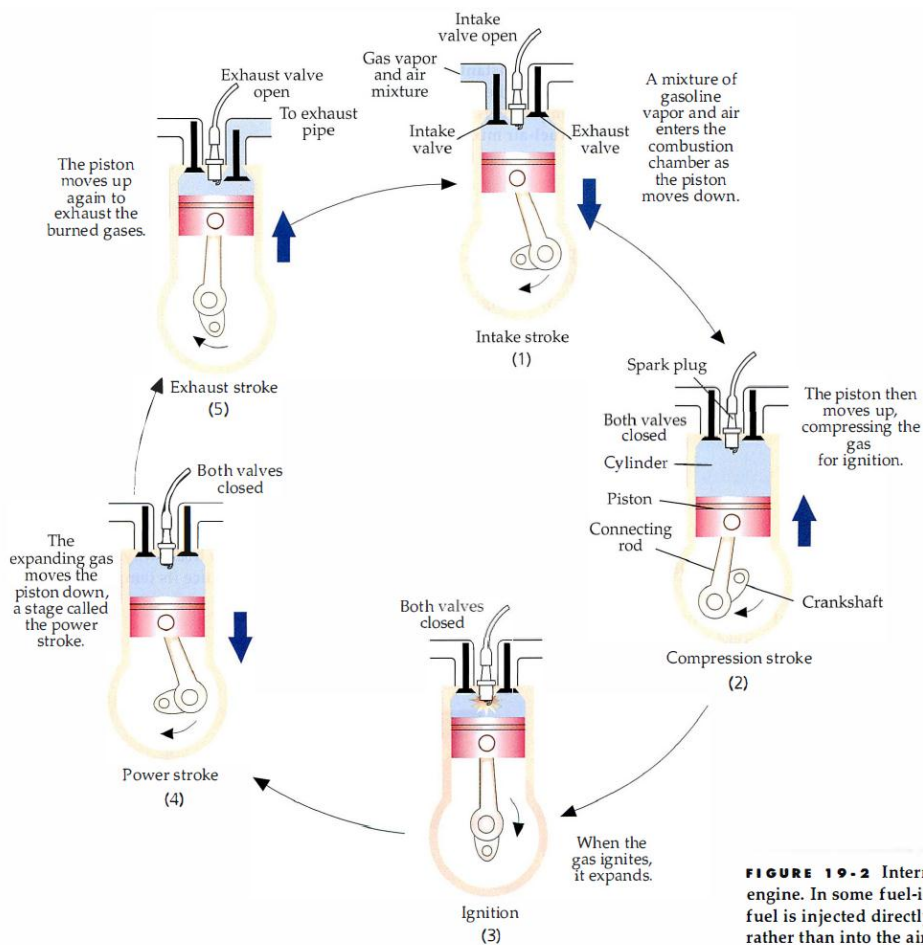


FIGURE 19-2 Internal-combustion engine. In some fuel-injected engines, the fuel is injected directly into the cylinder rather than into the air stream.

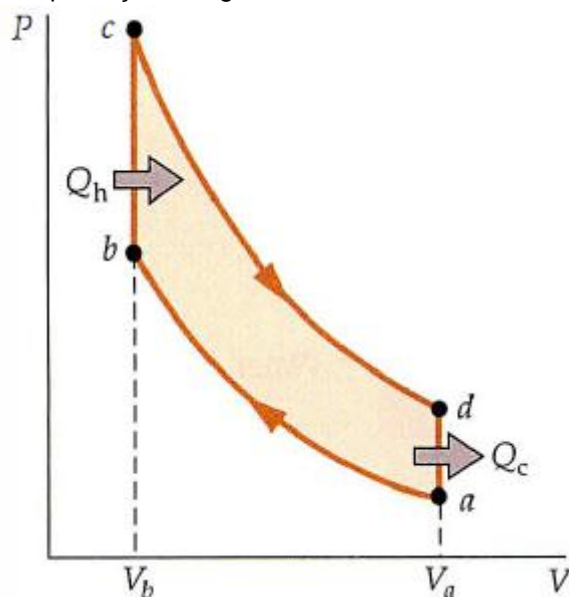
Fonte (Tipler, pg. 638).

Fica evidente a consideração de equivalência entre uma máquina a vapor e um motor a combustão.

Na legenda da figura 19.3 arremata:

“Ciclo Otto representando o motor de combustão interna. A mistura ar combustível e comprimida adiabaticamente de a até b. Ela é, então, aquecida (por combustão) a volume constante até c. O curso de potência é representado pela expansão adiabática de c até d. O resfriamento a volume constante de d até a representa a liberação de calor. Os produtos da combustão são trocados por uma nova mistura ar combustível a pressão constante na etapa a (não mostrado). Trabalho é realizado sobre o sistema durante a compressão adiabática e trabalho é realizado pelo sistema durante a expansão adiabática.

Fig. 4 – Reprodução da figura 19.3.



Fonte (Tipler, pg. 638).

No que se refere aos livros de ensino médio percebe-se que estes seguem de maneira próxima o que é apresentado nos livros em nível de graduação. Vejamos, por exemplo, Máximo (2006) em um tópico especial na p. 126, apresenta na seção 12.7 – Máquinas térmicas – Segunda Lei da Termodinâmica, procedendo então para uma consideração histórica principiando pelas máquinas a vapor e encerrando com a consideração do motor a combustão. Extraímos desta a passagem: no decorrer do século XX, foram inventados outros tipos de máquinas térmicas, destacando-se entre elas os motores de explosão, as turbinas a vapor, os motores a jato, etc. Na figura 12.28 então representa o motor de explosão de 4 tempos.

Analisado as máquinas térmicas, verificamos que existem alguns aspectos comuns ao funcionamento de todas elas. De fato, todas operam em ciclos, isto é, retornam periodicamente às condições iniciais e cada ciclo, esquematicamente, da maneira mostrada na fig. 12-29. Fica implícito nessa descrição que novamente o tratamento de uma máquina a vapor é diretamente transferido para a consideração do motor de explosão.

Diante das constatações acima, percebemos que são exceções os autores que elaboram textos com críticas a respeito da termodinâmica Clássica ou que apresentam formulações alternativas. Entretanto, encontra-se no livro intitulado *The Tragicomedy of Classical Thermodynamics* (a trágicomédia da termodinâmica Clássica, tradução nossa) de autoria de Clifford Truesdell, uma exceção as

abordagens usuais. Inicialmente, na pg.5, correspondente a introdução escreve (Clifford, pg.5):

Em nenhuma outra disciplina as mesmas equações foram tantas vezes publicadas por diferentes autores em diferentes notações e por isso atribuídas a si próprio, em nenhuma outra esses mesmos homens colocaram mãos à obra para escrever a história do assunto por uma década ou duas a partir de seu próprio artigo na teoria.

Quando trata da importância da matemática, escreve (Truesdell, pg. 8):

Desde o início das ciências matemáticas os matemáticos avaliaram as suposições e descartaram as desnecessárias. Esta é a própria essência do pensamento matemático. Na termodinâmica, ao contrário, as suposições desnecessárias foram valorizadas, repetidas, e infladas ao ponto de ocultarem toda a estrutura conceitual da teoria.

Quanto as considerações do trabalho de Carnot escreve (Truesdell, pg.10):

Carnot não seguiu a tradição da mecânica racional do décimo nono século, ele prezou pela generalidade e abrangência. Alternativamente, ele optou por apresentar os seus argumentos em palavras. Agora tudo o que pode ser dito em matemática pode também ser dito em palavras ordinárias. O contrário, entretanto, é falso e, como nós podemos facilmente verificar em experimentos domésticos, muito do que as palavras muitas vezes podem dizer precisa ser drasticamente revisado senão removido se o mínimo de lógica queremos alcançar. No tratado de Carnot nós encontramos a imprecisão que se tornou e permanece uma característica distinguível da termodinâmica para, e desde o dia em que lemos as palavras de Carnot tem havido divergências com o que ele realmente pretendia dizer.

Ao final da sentença fica claro a necessidade de se possuir contato com escritos originais para evitar afirmações ou conclusões que não constam ou não podem ser deduzidas a partir dos originais.

Seguindo na mesma referência, encontra-se (Truesdell, pg. 11):

Todos os cálculos de Carnot repousam sobre uma suposição ainda mais especial, a de que o corpo era um gás ideal: $pV = R\theta$. Assim, Carnot escolheu limitar a substância operante a mais especial das substâncias, o gás ideal, nas circunstâncias mais especiais, campos uniformes de temperatura e densidade.

Encontramos ainda uma afirmação bastante contundente, no que se refere ao ensino logicamente consistente, quando se lê (Truesdell, pg. 11):

No tratado de Carnot nós encontramos as primeiras das vastas declarações que cegam os estudantes racionais que procuram trazer

sentido para o que a termodinâmica afirma. Por exemplo, “o poder de gerar movimento por meio do calor é independente dos agentes utilizados para realiza-lo...” Desde que os “agentes” não são especificados, fica difícil conjecturar um sentido.

Em outras obras é possível perceber o cuidado dos autores em manter o “status” da termodinâmica de equilíbrio como uma teoria idealizada, esse, por exemplo, é o caso do que encontramos nas Lições de Física de Feynman (Feynman, pg 136).

Diante disso extrai-se a necessidade da elaboração de descrições cuidadosas com relação aquilo que se estabelece como hipóteses ao mesmo tempo em que se avalia a qualidade dos resultados obtidos.

3- Referencial teórico

Os trabalhos que abordam questões científicas profundas de maneira realmente didática contêm em sua essência diversos elementos que evocam o princípio da aprendizagem significativa. Assim a influência de David Paul Ausubel permeia, de forma difusa, praticamente todo conteúdo do trabalho proposto. No entanto, será demonstrado em seções posteriores que nem mesmo os subsunçores mais remotos se encontram de fato incorporados na cultura do público alvo. Por este motivo foram pesquisados diversos trabalhos fundamentais em física teórica, a fim de suprir a ausência destes subsunçores.

Dentre os principais autores de artigos seminais em física, tais como Einstein, Fermi, Prigogine, Schroedinger, Dirac, Bogoliubov, foram selecionados aqueles cuja abordagem partisse das premissas mais básicas, que orientam a concepção de modelos matemáticos, sem utilizar formalismos supérfluos e argumentos obscuros.

Neste sentido, no que diz respeito à abordagem didática, o trabalho segue uma linha composta por princípios adotados por Lev D. Landau e Richard P. Feynman em um sentido bastante amplo.

Em primeiro lugar, como recomendação geral, é adotada a abordagem de Landau, que consiste em levantar hipóteses fracas como ponto de partida para a obtenção de leis da Física. Hipóteses fracas são premissas consideradas mais

básicas e suficientemente confiáveis para ser empregadas na formulação de modelos e no desenvolvimento de novas teorias. Essas hipóteses são utilizadas de forma recorrente no trabalho de Landau, a fim de demonstrar que certas leis, antes consideradas fundamentais, revelam ser consequência direta dessas premissas ainda mais básicas. Como exemplo, a segunda lei de Newton, $F=ma$, pode ser deduzida a partir das hipóteses de isotropia e uniformidade do espaço.

Essa abordagem, contudo, apresenta desdobramentos que geram um sério inconveniente quando utilizada de forma mais ampla. Isso ocorre quando o pré-requisito mais legítimo para determinadas disciplinas são tópicos considerados mais avançados do que a própria disciplina. Como exemplo, a Mecânica Estatística, que hoje constitui o pré-requisito mais apropriado para as disciplinas de Termodinâmica e Fenômenos de Transporte, é ministrada apenas em alguns programas de pós-graduação, porque seus textos usuais são predominantemente formais, e, portanto, pouco didáticos. Ocorre que a Mecânica Estatística foi concebida posteriormente à Termodinâmica Clássica, com o intuito de fornecer uma base teórica mais sólida para a disciplina. Analogamente, a Física Quântica foi desenvolvida depois da Química com o mesmo propósito, sendo atualmente considerado o pré-requisito mais legítimo não só da Química, mas também da Física Nuclear e da Ciência dos Materiais. Em ambos os casos não houve preocupação em expressar esses pré-requisitos básicos de forma mais acessível, pois esses temas eram considerados apropriados apenas para poucos especialistas nas respectivas áreas. Dessa forma, a extensão natural da abordagem de Landau, que consiste em sempre utilizar os pré-requisitos mais fundamentais, oferece uma dificuldade inicial: tratar esses temas mais básicos de forma relativamente acessível ao público em geral, ainda que a título de abordagem preliminar.

A fim de simplificar a abordagem das verdadeiras disciplinas básicas, são utilizadas as quatro recomendações de Feynman para estudar temas relativamente complexos, que ofereçam dificuldades de assimilação em uma abordagem inicial. Essas recomendações informais podem, a princípio, parecer triviais, mas constituem, na prática, um exercício didático muito eficiente:

- i) Escrever sobre o tema, mesmo que de forma preliminar

- ii) Explicar para outras pessoas, a fim de identificar deficiências na exposição, tais como lacunas no conhecimento ou inconsistências lógicas
- iii) Recorrer à literatura para minimizar as deficiências identificadas
- iv) Simplificar a exposição, reformulando ideias e eliminando sentenças obscuras. Retornar então ao passo i, e repetir o roteiro até que o texto resulte em uma versão clara, concisa e objetiva da descrição do tema.

Como será mostrado a seguir, essa estratégia composta, baseada na abordagem de Landau e nas recomendações de Feynman, se mostra particularmente bem-sucedida ao tratar problemas envolvendo o comportamento dinâmico de grandes populações de moléculas. Dessa estratégia surge um modelo matemático preliminar bastante acessível para alunos do ensino médio, além de recomendações para seu posterior refinamento, material que pode ser empregado para introduzir também noções básicas de integração.

4 - Fatores que afetam o rendimento do motor Otto, segundo os profissionais da mecânica automotiva

Em uma enquete realizada entre profissionais da mecânica automotiva, que corresponde a segunda etapa do roteiro recursivo de Feynman, foi obtida uma lista de fatores que, segundo subsídios oriundos de sua prática cotidiana, constituem os principais responsáveis pela conversão de energia mecânica em energia térmica, o que caracteriza o desperdício de trabalho mecânico por dissipação via atrito. Esses fatores são enumerados a seguir:

- i) Atrito dos anéis com a camisa
- ii) Energia desperdiçada para movimentar o comando de válvulas
- iii) Perda de carga ao longo do escapamento
- iv) Atrito nos mancais e bronzinas
- v) Calor lançado para a atmosfera pela emissão dos gases de escape

Essa lista de causas primárias parece, a princípio, bastante razoável, e em geral reflete o senso comum quando surge em conversas informais com o público

em geral. Por influência do pensamento de Landau, essas supostas causas serão consideradas, a princípio como hipóteses fracas que dão início a um processo exploratório, cujo ponto culminante consiste na elaboração dos respectivos modelos matemáticos. Entretanto, essas causas não são justificadas de forma quantitativa, porque exigem, no mínimo, conhecimentos básicos de transferência de calor. Por exemplo, para justificar a importância da perda térmica pela emissão de gases de escape, seria necessário estimar a quantidade de energia térmica contida nesses produtos de combustão. Essa estimativa bastante simples exige apenas o conhecimento da vazão mássica dos gases de escape (m), da capacidade calorífica à pressão constante (C_p) e das temperaturas ambiente e dos gases lançados (T_g, T_a). Contudo, a estimativa baseada na expressão $q = m C_p (T_g - T_a)$ sequer é mencionada nas discussões. O apêndice A contém um pequeno código fonte utilizado para estimar o valor de q e comparar com o poder calorífico da gasolina. De acordo com a estimativa do sistema, menos de 2% do poder calorífico da gasolina é desperdiçado pelo motor ao lançar gases quentes na atmosfera. Esse resultado refuta o quinto item como responsável por perdas apreciáveis de rendimento no motor ciclo Otto.

4.1 - Limitações inerentes aos argumentos qualitativos

Embora cada uma das quatro causas restantes, supostamente responsáveis pelo baixo rendimento do motor ciclo Otto, possam ser facilmente refutadas utilizando equações relativamente simples, as pessoas que descartam qualquer das cinco hipóteses mencionadas o fazem utilizando apenas argumentos de natureza qualitativa. Essas refutações raramente resultam em consenso, por mais logicamente fundamentadas que possam parecer de antemão. Isto ocorre porque, como já exemplificado, ao abordar o tema com maior profundidade, surge naturalmente a necessidade de quantificação, o que revela as limitações da própria linguagem corrente, independente da capacidade de inferência dos interlocutores envolvidos na discussão.

Ao invés de refutar cada um dos itens apresentados, é mais conveniente ressaltar de forma definitiva a necessidade de quantificação, partindo em seguida para uma abordagem totalmente quantitativa. Para ressaltar essa necessidade, pode

ser considerada uma possível refutação para o primeiro item, que, para a maior parte dos entrevistados, constitui o principal responsável pela queda do rendimento dos motores a combustão. Para tanto, basta supor que o atrito dos anéis com a camisa seja de fato um dos principais fatores responsáveis por perdas de energia mecânica, devido à dissipação térmica. Caso isto realmente fosse verdade, os automóveis que utilizam freio motor em descidas longas deveriam acusar aquecimento apreciável quando em marchas reduzidas. Nessa situação, o veículo se desloca a baixas velocidades, recebendo correntes lentas de ar no radiador, enquanto o motor opera a rotações elevadas.

4.2 – A necessidade do emprego de modelos matemáticos ao invés de argumentos quantitativos

Embora o argumento mencionado revele conhecimento prático sobre o tema, não parece tão convincente quanto uma sentença envolvendo, ao invés de diversos adjetivos, quantidades bem definidas que descrevessem cenários específicos. Suponha-se que fosse relatado um teste no qual o veículo desligado em primeira marcha descesse uma ladeira a 10 Km/h, estando o motor a 5000 rpm. Neste caso, para que o argumento se tornasse mais convincente, bastaria afirmar que, ao final de um percurso de 1 km não foram constatadas diferenças significativas de temperatura na água do radiador. Ocorre que esse argumento quantitativo passa de fato a ser convincente quando se tem mente que um veículo parado com o motor operando em marcha lenta (em torno de 1000 rpm), rapidamente aciona a ventoinha para não ocorrer superaquecimento. Isto indica claramente que o atrito dos anéis com a camisa não produz tanto calor quanto a própria combustão que ocorre na câmara.

Embora para diversos profissionais do ramo esse último argumento pareça encerrar a questão, até mesmo versões mais quantitativas são consideradas ainda insuficientes por parte de especialistas mais rigorosos. A principal dificuldade decorrente do emprego de argumentos que envolvem certo grau de quantificação reside justamente no fato de que os próprios argumentos por si só não são, via de regra, amplamente aceitos no meio científico. Tanto para corroborar tanto para refutar ideias, é necessário que o argumento seja posto à prova em diferentes

condições de operação, produzindo estimativas numéricas que devem ser então confrontadas com dados experimentais. Além disso, o argumento deve possuir um respaldo adicional, que consiste em não violar certos princípios fundamentais da Física, sejam leis de conservação ou mesmo equações dinâmicas. Conclui-se então que é necessário procurar repostas definitivas sobre a questão do rendimento em algum ramo da Física que seja amplamente difundido no meio acadêmico.

Infelizmente, ocorre que o ramo da Física do qual seria de se esperar uma resposta confiável e objetiva, não cumpre efetivamente esse papel crucial. Como será discutido no próximo capítulo, a Termodinâmica Clássica, reduto da Física que supostamente contemplaria essa classe de questões, na verdade não fornece respostas objetivas nem tampouco definitivas sobre o assunto. Fornece apenas modelos bastante idealizados, cujos resultados numéricos discordam consideravelmente dos dados experimentais.

5 - Limitações conceituais e práticas da Termodinâmica Clássica

A ausência de subsunçores mencionada no capítulo dois se deve basicamente a dois fatores primordiais:

- I. Não existe sequer elementos de cultura popular previamente incorporados ao conhecimento do público alvo sobre o tema em estudo. Até mesmo os profissionais da mecânica automotiva não possuem este conhecimento prévio, como foi constatado na enquete descrita no capítulo 3.
- II. A própria termodinâmica clássica não fornece pré-requisitos legítimos para preencher as lacunas do conhecimento sobre a operação das verdadeiras máquinas térmicas. Este assunto será amplamente discutido a seguir.

O leitor já familiarizado com noções básicas de Termodinâmica poderia eventualmente criticar a iniciativa de promover uma enquete com os profissionais

da mecânica automotiva. Esse leitor poderia alegar que pessoas sem formação em Termodinâmica, não são capazes de encontrar as causas primárias do baixo rendimento dos motores ciclo Otto. Evidentemente, essa alegação se baseia na falsa premissa de que a própria Termodinâmica Clássica fornece subsídios para que essas causas sejam de fato identificadas. Contudo, a aplicação da Termodinâmica Clássica a problemas envolvendo processos de combustão é extremamente limitada, o que se deve a cinco razões fundamentais:

i) Motores de combustão não são meras máquinas térmicas

Quando o motor a combustão interna é tratado como um simples sistema de extração de trabalho mecânico que opera a partir de uma fonte e um sumidouro de calor, principal etapa do chamado ciclo térmico, a explosão, se reduz a uma simples e idealizada expansão de gases. Ignorar a principal fonte de energia, que consiste na própria reação de combustão, implica em desconsiderar a formação de novos produtos gasosos a partir da mistura ar-combustível. Esse processo gera uma quantidade de energia cinética muito maior do que a simples expansão de um gás que antes se encontrava comprimido. Essa relação afeta drasticamente o produto PV, isto é, a energia liberada no interior da câmara.

ii) Combustão e explosões não são processos reversíveis

Considerar que explosões constituem processos quase estáticos não configura apenas um flagrante absurdo do ponto de vista conceitual, mas implica em resultados numéricos totalmente inconsistentes com dados experimentais. Além disso, em vários textos consagrados de Termodinâmica Clássica a etapa de explosão é considerada um processo adiabático e reversível, o que configura uma autocontradição evidente. Naturalmente, o processo não pode ser ao mesmo tempo reversível (extremamente lento) e adiabático (extremamente rápido). Além disso, para que o processo de combustão fosse considerado adiabático, deveria ocorrer a uma velocidade tão superior à da própria combustão, que não haveria tempo hábil para se processar a troca térmica entre a câmara de combustão e a água de refrigeração. Em

outras palavras, a água do radiador permaneceria fria durante o processo, e os gases de escape seriam liberados para a atmosfera a temperaturas altíssimas. Não havendo troca térmica com a água de refrigeração, a temperatura da câmara deveria coincidir com a própria temperatura adiabática de chama da gasolina, que é de aproximadamente 2000°C. Essa temperatura é muito superior ao ponto de fusão do Ferro (em torno de 1500°C) e do Alumínio (cerca de 600 °C), de modo que o cano de descarga certamente fundiria durante o processo.

iii) O cálculo do rendimento de máquinas térmicas não leva em consideração aspectos geométricos, construtivos e operacionais.

O rendimento do ciclo é estimado somente com base nas suas temperaturas extremas de operação, ou nas respectivas quantidades de calor trocadas nesses mesmos extremos de temperatura.

iv) A operação dos motores de combustão não constitui um processo verdadeiramente cíclico

Quando ocorre o escape dos gases, e em seguida a admissão da mistura ar-combustível, a hipótese de igualdade entre os valores numéricos do calor transferido e do trabalho realizado ao longo de um ciclo perde totalmente a validade. A operação em ciclo fechado pressupõe implicitamente que os gases de escape não são liberados para a atmosfera, mas novamente comprimidos, para então atingir uma suposta "fonte quente" e então expandir outra vez.

v) A temperatura por si só não pode ser utilizada como função incógnita em problemas de transferência de energia

As consequências desse fato são mais profundas e abrangentes, produzindo inconsistências e situações paradoxais que serão discutidas de forma sumária.

5.1 - A Temperatura como medida da dispersão de distribuições espectrais

Dentre as cinco razões pelas quais a Termodinâmica clássica não fornece uma descrição adequada para os fenômenos ocorridos durante a etapa de explosão, o emprego da temperatura como principal variável dependente nas formulações em Termodinâmica constitui um item conceitual e quantitativo que merece destaque por parecer, a princípio, apenas uma sutileza. A fim de elucidar essa afirmativa, inicialmente pode ser considerada a evaporação de uma poça de água, um fenômeno bastante corriqueiro cuja análise parece, à primeira vista, não oferecer maiores dificuldades. Entretanto, mesmo a temperaturas muito inferiores a 100°C , várias moléculas de água se desprendem da fase líquida em direção à atmosfera. Essa mudança de fase, que ocorre muito abaixo do ponto normal de ebulição da água, se justifica pelo rompimento das ligações intermoleculares, que é provocado pela incidência de radiação solar. A radiação solar incidente, por sua vez, possui um espectro, isto é, uma combinação de feixes monocromáticos em proporções bem definidas. Esses feixes atingem a superfície da água, provocando o rompimento das ligações intermoleculares e, conseqüentemente, a própria mudança de fase.

Ocorre que a grandeza chamada temperatura representa somente um funcional calculado a partir de uma distribuição de frequências, isto é, apenas um parâmetro numérico obtido via integração da respectiva distribuição espectral. Em suma, a temperatura possui um status equivalente ao de qualquer momento de funções que definem distribuições de probabilidades. Esses parâmetros, tais como a variância, a assimetria e a curtose, constituem meras informações truncadas sobre a função de distribuição original ou o histograma de frequências correspondente. *Aqui está precisamente o ponto central da discussão.* Considerando os recursos computacionais hoje disponíveis, não parece existir qualquer motivo razoável para utilizar, em modelos matemáticos, a variância ao invés da própria distribuição espectral a partir da qual essa medida de dispersão foi estimada. A riqueza das informações oriundas da função espectral é quase totalmente perdida ao utilizar, em seu lugar, uma medida grosseira de seu grau de dispersão. Essa medida grosseira passa então a representar a função incógnita em modelos matemáticos de transferência de calor e Termodinâmica, gerando inconsistências que serão apresentadas a seguir.

5.1.1 – Inconsistências geradas ao ignorar o espectro de radiação

Quando a temperatura é utilizada, ao invés da distribuição espectral, como principal variável dependente em problemas de transferência de calor, surgem concepções imediatistas que conduzem a inconsistências grosseiras. Uma dessas concepções imediatistas consiste na chamada lei zero da Termodinâmica. Segundo a lei zero, a energia térmica sempre se propaga do meio mais quente para o meio mais frio. Essa suposta lei induz a aceitar que a energia se propaga essencialmente por condução, e não por radiação. Isso implica que, em um meio multi-composto, a temperatura deve decrescer entre camadas sucessivas de materiais que separam uma fonte térmica de um meio mais frio, independente do espectro da radiação incidente.

É sabido que a energia de um feixe de radiação depende de sua frequência. A frequência define a capacidade do feixe de penetrar meios materiais, fragmentar estruturas moleculares e assim catalisar reações. Isto ocorre porque é preciso romper ligações previamente existentes para formar novas ligas, o que define os respectivos compostos intermediários e os produtos de reação correspondentes. Neste cenário, a temperatura se mostra um parâmetro totalmente inadequado para estimar a capacidade de uma fonte térmica em efetuar transformações moleculares. Como exemplo, existem diversas reações orgânicas que simplesmente não ocorrem mesmo a altíssimas temperaturas e pressões. Contudo, são deflagradas imediatamente quando o recipiente que contém os respectivos reagentes é atingido por um feixe de radiação ultravioleta, mesmo não colimado e de baixíssima potência (tipicamente em torno de 5W). De forma análoga, a centelha de uma vela de ignição catalisa a reação entre o combustível e o oxigênio retirado da atmosfera. Essa centelha, também de baixíssima potência, nada mais é do que a radiação emitida pelos polos do secundário da bobina de ignição. Essa radiação possui um espectro rico em componentes que vão desde o azul até o ultravioleta, em proporções que dependem basicamente da tensão aplicada. Quanto maior a tensão, maior a proporção de radiação de alta frequência. Nos motores a combustão, quanto maior a proporção de radiação de alta frequência, maior a quantidade de Nitrogênio oxidado na câmara. Embora o Nitrogênio seja considerado gás inerte, a presença de radiação de alta frequência o torna combustível. Isso ocorre também em alguns dos chamados “motores a ar”, onde o Nitrogênio queima em presença do Oxigênio,

produzindo energia e subprodutos de reação, tais como N_2O , NO_2 e N_2O_5 , os chamados NO_x . Em resumo, essas reações extras de combustão aumentam o rendimento do motor, mas geram os NO_x , produtos inconvenientes do ponto de vista ambiental.

Considerando ainda que, para a mesma temperatura, podem existir diversas distribuições espectrais, esse parâmetro se torna ainda menos representativo do espectro da radiação presente na câmara de combustão. No entanto, como já mencionado, o rendimento limite de máquinas térmicas é definido com base nas temperaturas extremas do ciclo:

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Uma análise relativamente superficial dessa equação é capaz de revelar situações paradoxais até mesmo para cenários físicos bastante simples. Suponha-se que, ao invés de uma reação de combustão, a força motriz de um motor Otto fosse originada a partir de qualquer processo que produzisse aumento de pressão na câmara. Exemplos típicos de eventos dessa natureza consistem em reações entre ácidos e carbonatos. Essas reações produzem grandes quantidades de dióxido de carbono, aumentando significativamente a pressão na câmara, mas não provocando aquecimento em seu interior, Isso ocorre porque essas reações são ligeiramente endotérmicas. Dessa forma, as temperaturas extremas do ciclo pouco difeririam uma da outra, resultando em um rendimento próximo de zero. Note-se que, de acordo com a equação (), o rendimento da operação não considera o aumento de pressão na câmara devido ao incremento do número de moles gasosos ao longo da reação. De fato, a diferença de pressão, e não de temperatura, é a principal variável a considerar nessa análise, pois constitui a grandeza responsável pela produção de trabalho mecânico. Sem a geração de trabalho, definido como

$$W = \int P dV$$

não faz sentido estimar o rendimento de um motor. Esse raciocínio permanece válido para qualquer processo reativo no qual o incremento da pressão na câmara se deve predominantemente ao aumento do número de moles gasosos, e não à expansão do gás causada pelo aumento da temperatura.

6 - Subsídios básicos para a formulação do modelo matemático

A fim de preencher as lacunas mencionadas no capítulo anterior, serão apresentados argumentos básicos de natureza essencialmente prática que orientam a elaboração do modelo matemático preliminar. Neste ponto encontramos novamente a influência de Landau, no sentido de prover os pré-requisitos mais básicos possíveis, além de abordar o tema de maneira absolutamente concreta.

Uma vez descartados os conceitos e modelos da Termodinâmica Clássica para estimar o rendimento do motor ciclo Otto, resta uma constatação de natureza prática a explorar. Levando em conta a superioridade considerável do rendimento do motor Wankel frente ao ciclo Otto, a investigação de uma provável causa primária para o baixo rendimento dos motores passou a ser focada em aspectos geométricos. Uma vez que a geometria da câmara de combustão do motor Wankel difere consideravelmente do formato cilíndrico da câmara do motor ciclo Otto, parece razoável supor, a princípio, que a influência da geometria sobre o rendimento do motor seja apreciável.

Novamente são identificadas as influências tanto de Feynman quanto de Landau. A influência de Landau é caracterizada pelo surgimento de uma nova hipótese fraca, a saber, que a geometria da câmara de combustão deve exercer influência considerável no compute do rendimento do motor. Já a influência de Feynman é identificada de imediato ao verificar que esta constatação foi inferida ao efetuar a terceira etapa do seu roteiro de estudos.

Além do argumento exposto convém lembrar que a Termodinâmica Clássica é aplicável somente a processos reversíveis, e, portanto, quase estáticos, esse modelo deveria ser baseado na Termodinâmica dos processos irreversíveis, para que pudesse ser considerado realista. De fato, como já mencionado, a combustão e a explosão são fenômenos transientes por natureza. Portanto, esses fenômenos não podem, em hipótese alguma, serem classificados como quase estáticos.

A Termodinâmica dos processos irreversíveis oferece uma alternativa bastante sofisticada para estimar o rendimento de ciclos térmicos: modelos baseados na equação de Liouville [Zubarev]¹.

Entretanto, do ponto de vista didático, esses modelos são absolutamente inacessíveis para alunos do ensino médio, porque envolvem a compreensão da formulação hamiltoniana da Mecânica Quântica, ou de sua versão equivalente, a formulação lagrangeana.[Felsager]² Ambas as formulações exigem conhecimentos profundos sobre equações diferenciais parciais a coeficientes variáveis. Além disso, esses modelos multi-partícula demandam enorme esforço computacional, de modo que essa primeira alternativa foi considerada inviável, havendo sido então descartada.

Em face da inviabilidade do emprego dos modelos baseados na equação de Liouville, restou ainda uma alternativa baseada no pré-requisito fundamental da Termodinâmica dos processos irreversíveis, denominado Mecânica Estatística [Andrews]³. A Mecânica Estatística consiste no estudo do comportamento dinâmico de grandes populações de moléculas, denominados ensembles. Esses grandes conjuntos de moléculas são classificados em três categorias:

- o ensemble micro canônico, que consiste em um sistema isolado, por não transferir massa nem energia com as vizinhanças;
- O ensemble canônico, que consiste em um sistema fechado, porém não isolado, por transferir apenas energia com as vizinhanças;
- O ensemble grand canônico, que consiste em um sistema aberto, por trocar massa e energia com o meio externo.

Cada um desses ensembles possui uma distribuição particular de energia entre suas respectivas moléculas constituintes. De forma análoga, cada distribuição informa a fração do número de moléculas que possui determinado nível de energia, quando o sistema se encontra a uma certa temperatura. É importante observar que, neste caso, a temperatura está sendo utilizada apenas como parâmetro de distribuições de energia.

Embora a maior parte dos processos termodinâmicos que ocorrem na natureza, e mesmo nos equipamentos industriais, possa ser modelado de forma rigorosa apenas quando se utiliza o ensemble grand canônico, existe uma particularidade no funcionamento do motor ciclo Otto que permite o emprego do ensemble canônico para efetuar a simulação do processo de geração de energia

mecânica no interior da câmara de combustão. Ocorre que somente o terceiro dos quatro tempos de funcionamento do motor ciclo Otto, a saber, a etapa de explosão, contribui efetivamente para a produção de energia mecânica no interior da câmara. Apenas nessa etapa ocorre a geração dos produtos gasosos de combustão, a partir da mistura ar-combustível. Assim, somente nessa etapa ocorre a expansão que impulsiona o pistão, produzindo trabalho mecânico.

Considerando que nesta etapa as válvulas de admissão e escape estão ambas fechadas, o sistema troca apenas energia com as vizinhanças, e não massa. Assim, na etapa de explosão, o sistema pode ser considerado fechado, de modo que conjunto de moléculas que colidem com as paredes da câmara pode ser considerado um ensemble canônico, sem qualquer perda de exatidão. Isto resulta em uma simplificação considerável nos cálculos a efetuar, com relação ao tratamento matemático do ensemble grand canônico. Essa simplificação é justificada a seguir.

A principal simplificação resultante da premissa de que o sistema pode ser considerado fechado durante a etapa de explosão, reside no fato de haver sempre o mesmo número de moléculas colidindo com as paredes da câmara ao longo do processo de expansão. Naturalmente, essa premissa implica na existência de uma suposição implícita: a de que a frente de combustão se propaga com velocidade muito superior à do pistão, de modo que se pode considerar a ausência total de combustível ainda não detonado dentro da câmara. Entretanto, esse pressuposto é válido para uma ampla faixa de rotação do motor, considerando que o avanço automático do ponto de ignição foi concebido exatamente para que não haja desperdício de combustível, ou seja, para que não reste combustível ainda não detonado no interior da câmara de combustão.

De posse dos elementos básicos para efetuar a formulação de um modelo matemático preliminar para estimar o rendimento do motor, resta apenas considerar que, a cada colisão, as moléculas dos produtos de combustão transferem energia térmica para as paredes metálicas da câmara, mas não necessariamente transferem energia mecânica que resulte, em última instância, no movimento do pistão. Obviamente, apenas as moléculas que colidem com o topo do pistão fornecem energia mecânica que resulta efetivamente em trabalho. Assim, a fração das moléculas que colidem exclusivamente com o topo do pistão poderiam, a princípio,

fornece uma medida confiável do rendimento real do motor. Contudo, é importante observar que essas moléculas não incidem perpendicularmente sobre essa superfície. Existem diversos ângulos possíveis de incidência, e apenas a componente perpendicular à superfície deve ser considerada efetiva para impulsionar o pistão, produzindo trabalho. Quando os ângulos de incidência são considerados equiprováveis, basta tomar o valor médio entre esses ângulos como medida representativa da direção de incidência. O seno desse ângulo médio representa a fração da energia cinética que atua na direção paralela ao curso do pistão, fazendo com que este mova a biela, que impulsiona o virabrequim, colocando o motor em funcionamento.

Em resumo, até então foram identificadas duas variáveis responsáveis pela definição do rendimento dos motores ciclo Otto. A primeira variável define a fração das moléculas que colide exclusivamente com o topo do pistão. A segunda variável define a fração da energia cinética efetivamente transferida para o topo do pistão nessa colisão. O produto entre essas duas grandezas representa, portanto, uma estimativa para o valor do rendimento dos motores ciclo Otto.

Cabe aqui uma observação importante. O leitor que eventualmente conhecesse formulações em Termodinâmica Estatística poderia, a princípio, questionar de que forma a distribuição de energia do ensemble canônico seria considerada no modelo matemático preliminar. É exatamente neste aspecto que o modelo preliminar se revela surpreendentemente simples e realista, a exemplo de várias outras estimativas baseadas em Termodinâmica Estatística. Ocorre que a distribuição de energia seria particularmente útil no cálculo da quantidade de calor transferida das moléculas para o reticulado metálico que compõe a tampa do cilindro, a camisa e o topo do pistão. Entretanto, essa função não é necessária para estimar a energia mecânica transferida exclusivamente para o topo do pistão durante as respectivas colisões. A energia mecânica transferida depende essencialmente da velocidade média de translação das moléculas. O valor da velocidade, por sua vez, pode ser facilmente obtido a partir da temperatura interna da câmara, que naturalmente se supõe pré-aquecida. É conveniente lembrar que a hipótese segundo a qual o motor está “quente”, ou seja, opera em regime estacionário, é válida a partir de 2 ou 3 minutos de funcionamento do motor, constituindo assim uma hipótese fraca.

Levando em consideração que ambos os fatores identificados como supostamente responsáveis pela definição do rendimento são de natureza geométrica, nenhum deles pode depender da velocidade média de translação das moléculas. Como será mostrado a seguir, essa constatação proporciona uma simplificação adicional que torna o modelo bastante intuitivo, mesmo para alunos do ensino médio, pois requer apenas o conhecimento prévio de operações aritméticas. Entretanto, nesse modelo preliminar, o rendimento deve resultar independente da temperatura.

O próximo capítulo apresenta o modelo matemático preliminar baseado nos dois parâmetros geométricos mencionados anteriormente. A formulação do modelo é bastante simples, além de proporcionar uma intuição dinâmica não apenas acessível, mas também realista, dos fenômenos que justificam a perda de energia durante a etapa de explosão.

7 - Modelo matemático simplificado para estimar o rendimento do motor

Nesta seção é formulado um modelo matemático para estimar a fração da energia gerada no processo de combustão que é efetivamente empregada para impulsionar o pistão, produzindo movimento. Esse modelo preliminar considera que apenas as colisões entre as moléculas dos produtos de combustão e o topo do pistão contribuem de fato para a movimentação do motor. As colisões contra as paredes fixas da tampa e da área lateral da camisa proporcionam apenas a troca de energia térmica entre as moléculas e as paredes metálicas. Desse modo, essas colisões provocam somente a transferência de calor do bloco do motor para a água de refrigeração, não contribuindo realmente para a produção de trabalho mecânico. Assim, o rendimento relativo à área efetiva para fins de colisão é definido como

$$Ra = \frac{Ap}{Ap + At + Al}$$

Nesta equação, Ap , At e Al representam, respectivamente, as áreas do topo do pistão, da tampa e da lateral da camisa. Essas áreas são aproximadas pelas seguintes expressões:

$$Ap = At = \pi r^2$$

$$Al = \pi r c$$

Nessas expressões, r é o raio do pistão e c é seu curso. Em particular, a definição da área lateral da camisa considera que o rendimento é calculado no ponto médio do percurso do pistão, isto é, entre o ponto morto superior e o inferior. Por essa razão Al resulta metade da área lateral do cilindro: a altura considerada corresponde à metade do curso do pistão.

Substituindo as estimativas para os valores das áreas na expressão que define o respectivo fator de rendimento, resulta

$$Ra = \frac{\pi r^2}{\pi r^2 + \pi r^2 + \pi r c}$$

Simplificando a expressão resultante, obtém-se

$$Ra = \frac{1}{2 + \frac{c}{r}}$$

Em resumo, esse fator depende apenas da relação entre o diâmetro e o curso do pistão.

Além do fator relativo à área, existe também uma medida de rendimento referente ao ângulo médio de incidência das moléculas que colidem com o topo do pistão. Considerando que essas moléculas podem colidir com a superfície em ângulos que variam entre 0 e 90 graus, e supondo que não existem ângulos de incidência mais prováveis, uma estimativa razoável para o ângulo médio de incidência corresponde ao próprio valor médio entre os extremos 0 e 90. Para um ângulo médio de incidência de 45 graus, a fração da energia cinética utilizada efetivamente para impulsionar o pistão é da ordem do seno desse ângulo, que corresponde a aproximadamente 70% da energia cinética disponível:

$$Ri = 0,7$$

Nesta equação, o índice i se refere ao ângulo médio de incidência da molécula ao colidir com o topo do pistão, sendo, portanto, um mnemônico para o termo incidência.

Uma vez obtidas estimativas para as perdas de energia devido a ambos os fatores geométricos, o rendimento total correspondente é definido pelo produto entre os respectivos fatores isolados:

$$\eta = RaRi = \frac{0,7}{2 + \frac{c}{r}}$$

Tomando como exemplo o caso de um motor cuja relação entre diâmetro e curso seja de aproximadamente 1:1, isto é, $c = 2r$, o rendimento estimado resulta

$$\eta = \frac{0,7}{2 + \frac{2r}{r}} = \frac{0,7}{4} = 17,5\%$$

Ainda que o rendimento real do motor que utiliza ciclo Otto seja ligeiramente superior a 20%, essa estimativa pessimista representa corretamente a ordem de grandeza do respectivo valor experimental. Esse modelo poderia ser refinado, considerando que

a média das frações ao longo do percurso do pistão resultaria em um valor ainda mais realista. Isto ocorre porque, quanto mais próximo do ponto morto superior, maior seria a pressão exercida sobre o topo do pistão, e portanto, maior resultaria o respectivo trabalho mecânico realizado. Conseqüentemente, o modelo refinado poderia representar uma média ponderada entre os valores de Ra desde o ponto morto superior até o inferior, onde o peso correspondente seria dado pelo valor local da pressão ou do próprio trabalho mecânico correspondente. Assim, valores mais realistas para o fator Ra poderiam ser obtidos através de uma integral em y , desde 0 até c , cujo integrando seria definido como o produto entre a pressão e o valor local do fator que define o rendimento.

Naturalmente, para fins de argumentação, a estimativa mais refinada não é realmente necessária, pois o modelo preliminar já cumpre o objetivo inicial do trabalho. Esse objetivo consiste em constatar que determinadas discussões não podem atingir um consenso definitivo sem que haja argumentos quantitativos ou modelos matemáticos, ainda que aproximados. Esses argumentos e modelos podem ser utilizados para avaliar pontos de vista divergentes de forma mais objetiva. De fato, discussões de caráter puramente qualitativo frequentemente se tornam meros exercícios de retórica, onde o interlocutor mais habilidoso pode muitas vezes induzir ao erro pessoas racionais e experientes.

Embora o modelo preliminar seja suficiente para elucidar a natureza das perdas, a implementação do modelo baseado em uma formulação integral fornece um elemento chave para elucidar, de forma mais detalhada, o funcionamento do motor ciclo Otto. Esse tópico é abordado a seguir.

8 - Refinamento do modelo proposto

O rendimento local do motor pode ser definido como

$$\eta_l = \frac{0,7\pi r^2}{\pi r^2 + \pi r^2 + 2\pi r(c - y)}$$

onde y representa a posição do pistão, que varia entre 0 e o valor do curso (c). Nessa equação, a área lateral do cilindro é variável, definindo valores locais para o rendimento. Simplificando a expressão, obtém-se

$$\eta_l = \frac{0,35}{1 + \frac{c - y}{r}}$$

Note-se que rendimento local atinge seu valor máximo no ponto morto superior, onde $y=c$. Nesse ponto, para $c=2r$, o fator η_l vale aproximadamente 35%. À medida que o pistão desce em direção ao ponto morto inferior, o rendimento local decresce, até atingir seu valor mínimo, em torno de 11,7%.

A fim de avaliar o valor médio do rendimento, não basta efetuar apenas a integração dos valores locais ao longo do percurso, e então dividir pelo curso do pistão. Ocorre que as contribuições locais para a produção de trabalho mecânico são também diferentes, atingindo desde o valor máximo no ponto morto superior, onde a pressão é máxima, até o valor mínimo, no ponto morto inferior, onde o volume da câmara é máximo, e, portanto, a pressão é mínima. Assim, a integral a calcular deve constituir uma média ponderada entre os valores locais do rendimento, cuja respectiva função peso pode ser representada pela densidade, pela pressão, pelo número de colisões por unidade de área ou mesmo pelo trabalho mecânico produzido ao longo de um intervalo infinitesimal em torno da posição do pistão. Desse modo, a expressão que define o rendimento médio a partir de seus respectivos valores locais seria dada, a princípio, por

$$\eta = 0,35 \int_0^c \frac{w(y)}{1 + \frac{c - y}{r}} dy$$

Nessa expressão, a função peso $w(y)$ poderia, a princípio, ser definida pelo termo PV, grandeza que poderia ser obtida de forma explícita em termos do volume V , e

portanto, da posição y . Para tanto, deveria ser empregada uma equação de estado, que relaciona a pressão com o volume e a temperatura.

A maior dificuldade em obter a função peso para definir a integral a avaliar reside no fato de não haver equações de estado para gases reais, que expressem a pressão em termos do volume e da temperatura de forma realista para as condições típicas de operação de motores a combustão. Além disso, a temperatura da câmara também depende da posição do pistão, e para esse cenário específico não existem correlações empíricas na literatura que forneçam diretamente a dependência de T em função de y . Entretanto, a partir de um argumento também baseado na Mecânica Estatística, é possível obter uma expressão bastante realista para a função peso.

A fim de obter a função peso, inicialmente é preciso considerar que o número de colisões entre as moléculas e o topo do pistão varia ao longo de sua trajetória, isto é, desde $y=0$ até $y=c$. O número de colisões por unidade de área pode ser estimado a partir da frequência de colisão, definida pelo quociente entre a velocidade média das moléculas e a distância média entre as paredes da câmara. No ponto morto inferior, essa distância é da ordem do próprio curso do pistão, enquanto no ponto morto superior, seu valor resulta consideravelmente menor. Neste trabalho considera-se que a distância média junto ao ponto morto superior é reduzida por um fator da ordem da taxa de compressão, isto é

$$l_{pi} = c$$

e

$$l_{ps} = \frac{c}{t_c}$$

Nessas equações, l_{pi} e l_{ps} representam, respectivamente, as distâncias médias entre interfaces sólidas nos pontos mortos inferior e superior, e t_c é a taxa de compressão. Assim, as frequências junto aos extremos do percurso são definidas como

$$f_{pi} = \frac{v_{pi}}{c}$$

e

$$f_{ps} = \frac{v_{ps} t_c}{c}$$

As velocidades, por sua vez, são estimadas utilizando os valores médios da distribuição maxwelliana:

$$v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

Nessa expressão, R é a constante universal dos gases, T a temperatura absoluta e M a massa molar média dos produtos de combustão (água e dióxido de carbono), cujo valor aproximado é de 30g/mol.

De posse dessas informações pode ser obtida uma expressão analítica para a função peso. Apenas por uma questão de simplicidade, considera-se que a frequência varia linearmente entre os pontos extremos, ou seja,

$$R_f = f_{pi} + \frac{(f_{ps} - f_{pi})y}{c}$$

O fator R_f representa a contribuição da frequência para o valor local do rendimento. Essa grandeza será agora utilizada para definir a função peso, através de normalização. O valor da integral de R_f entre os extremos é expresso em termos das velocidades e da taxa de compressão como

$$\int_0^c R_f dy = v_{pi} + \frac{v_{ps}t_c - v_{pi}}{2}$$

Dividindo R_f pelo resultado da integral e simplificando a expressão resultante, obtém-se

$$w = 2 \frac{(v_{ps}t_c - v_{pi})y + cv_{pi}}{(v_{ps}t_c - v_{pi})c^2}$$

Essa é a função peso, que deve ser multiplicada pelo rendimento local do motor, para então ser integrada, fornecendo uma estimativa mais acurada para o respectivo rendimento médio. Substituindo () em (), resulta

$$\eta = 0,7 \int_0^c \frac{(v_{ps}t_c - v_{pi})y + cv_{pi}}{\left(1 + \frac{c-y}{r}\right)(v_{ps}t_c - v_{pi})c^2} dy$$

Essa integral é conhecida, e figura explicitamente no apêndice B. Esse apêndice contém o código fonte empregado para estimar o rendimento médio do motor ciclo

Otto. A tabela 1 mostra valores numéricos para essa função em temperaturas típicas de operação dos motores. Esses valores são bastante realistas, e discordam significativamente da estimativa resultante do emprego o modelo de rendimento ideal (equação ()), obtido via Termodinâmica clássica.

Tabela 1 – Rendimento estimado no trabalho proposto x rendimento ideal (%)

$T_{pi}(K)$	Modelo proposto	Rendimento ideal
700	22,3	69,6
800	22,3	65,2
900	22,3	60,9

É importante observar que a estimativa para o rendimento fornecido pelo modelo proposto apresenta baixa sensibilidade a variações na temperatura no ponto morto inferior (T_{pi}). Ocorre que estão sendo negligenciadas as forças repulsivas entre as moléculas, que só poderiam ser corretamente avaliadas ao empregar modelos quânticos. Entretanto, essa abordagem exigiria o emprego de recursos que fogem ao escopo do trabalho.

9- Relato de experiência

A aplicação deste produto educacional foi feita com duas turmas, 60 alunas, entre 14 e 15 anos, do primeiro ano do Curso Normal do Instituto Estadual de Educação Barão de Tramandaí.

A física relacionada a termodinâmica um motor a combustão, pode, em princípio, ser de fácil compreensão para quem já visualizou e sabe como o mesmo funciona, entretanto, o ensino se torna muito mais distante de uma compreensão efetiva quando da ausência dos requisitos mínimos no que se refere a linguagem técnica inerente interno das máquinas fica complicado de entender todo o processo da combustão e o cálculo do rendimento. fenômeno que se está estudando fazendo comparações com o cotidiano e com coisas fáceis dos alunos compararem.

As turmas piloto onde o produto foi aplicado são do curso normal o que corresponde ao antigo magistério. Nesta etapa de ensino todos os conteúdos de física devem ser ensinados no período de um ano, dispondo para tal dois períodos de aulas por semana. É fato sabido de que, na maioria das vezes, nessa modalidade de ensinamentos se restringiam a cinemática e a dinâmica, enquanto que pouco tempo sobrava para outros conteúdos. Tendo em vista que muitos alunos já vêm com o a parte da cinemática bem desenvolvida no Ensino fundamental implementamos uma mudança sutil. Durante as três primeiras semanas foi seguido ritual dos anos anteriores. Foi realizada uma sondagem do que eles já sabiam sobre física. Nesta etapa percebemos que poderíamos avançar o conteúdo sem prejuízos de aprendizagem e com a possibilidade de fazer um trabalho mais interessante no que se refere a termodinâmica para a aplicação, em sala de aula, do produto educacional.

Na busca por saberes que elas já possuíam sobre a termodinâmica trabalhamos o conceito de calorimetria com vistas a ambientar as alunas, sem os quais não avançaríamos no aprendizado do que acontece durante a combustão dos gases e tão pouco perceberiam a necessidade de discutir rendimento dos motores.

Em seguida prosseguimos com as leis da termodinâmica para entender o porquê de se estar buscando o rendimento dos motores Otto.

Durante essa etapa foram realizadas as sondagens com relação a presença de conceitos associados aos aspectos técnicos do funcionamento dos motores.

Como primeiro desafio, foi sugerido aos estudantes uma enquete para ser realizada junto aos especialistas mecânicos de oficinas automotivas da cidade, para que pudéssemos elencar as possíveis causas apontadas sobre o que poderia prejudicar rendimento dos motores Otto de quatro tempos. Como atividade de casa, mesmo antes de terminar a revisão da dinâmica, elas tiveram que visitar oficinas mecânicas das suas cidades, aqui no litoral, e perguntar ao técnico em mecânica de automóveis sobre o rendimento dos motores a gasolina.

As alunas se reuniram em 5 grupos de 7 componentes cada, para pesquisarem junto as oficinas mecânicas de Tramandaí e arredores sobre a opinião leiga dos proprietários técnicos mecânicos sobre o que poderia afetar o rendimento dos motores convencionais utilizados pela maioria dos carros da cidade.

Uma curiosidade com relação a saída á campo das estudantes, para entrevistar os mecânicos, foi a dificuldade em se entrar em contato com um profissional que realmente pudesse trazer para a conversa conceitos termodinâmicos. Além disso, os relatos iniciais apontavam a falta do entendimento das partes mecânicas constituintes do motor.

Tentamos contornar tais dificuldades por meio do uso do livro didático. É interessante notar que a maioria dos livros dedica seção para a consideração dos motores a combustão. Entretanto a sua consideração, por meio da termodinâmica do equilíbrio, além de estar equivocado impõe o conhecimento de uma linguagem bastante específica. O produto educacional foi pensado e implementado para resolver este problema, ou seja, com o intuito de entender as terminologias próprias do funcionamento dos motores.

Inicialmente consideramos a possibilidade de nos deslocarmos junto com as estudantes para conhecer uma oficina da cidade e mostrar a elas as peças que fazem parte do motor e que estão relacionados ao estabelecimento do rendimento termodinâmico e, com isso, facilitar e promover o aprendizado sobre que acontece termodinamicamente em seu interior. Entretanto, por várias razões, isso acabou por se revelar inviável. Optamos então por adquirir um motor de moto de CG 125 cm³. Tal motor então foi verticalmente seccionado para que as estudantes pudessem observar o que acontece durante o curso do pistão para completar seu ciclo durante os 4 tempos. Para que os movimentos pudessem ser simulados uma manivela foi

adaptada. É importante ressaltar a empolgação das estudantes com aspectos simples, como o fechar e abrir das válvulas impulsionadas pelas varetas que por sua vez, se movimentam graças a um eixo chamado comando.



Figura 5 Estudantes na oficina acompanhando a montagem do motor seccionado

Tal abordagem permitiu também que as estudantes pudessem observar as etapas da montagem do motor, fizessem comentários, o que igualmente se revelou em um momento de esclarecimento de dúvidas.

Como a termodinâmica de equilíbrio não permite considerar os fenômenos de um motor a combustão estabelecemos uma nova interpretação no que se refere a consideração dos aspectos geométricos e a implementação de um modelo matemático simplificado. Para exemplificarmos os aspectos geométricos que determinam o rendimento, por exemplo, na consideração das áreas de cilindro e tampa, bem como o fator colisional utilizamos alguns elementos que seriam descartados como latas plásticas de balas e canos de papelão, como pode ser acompanhado na figura 6. Tal metodologia acabou por não se restringir ao ensino dos conteúdos de física e passou a ser utilizada também no ensino de aulas de geometria, igualmente ministradas pelo autor do presente trabalho. Revelando assim o caráter transdisciplinar do presente produto.

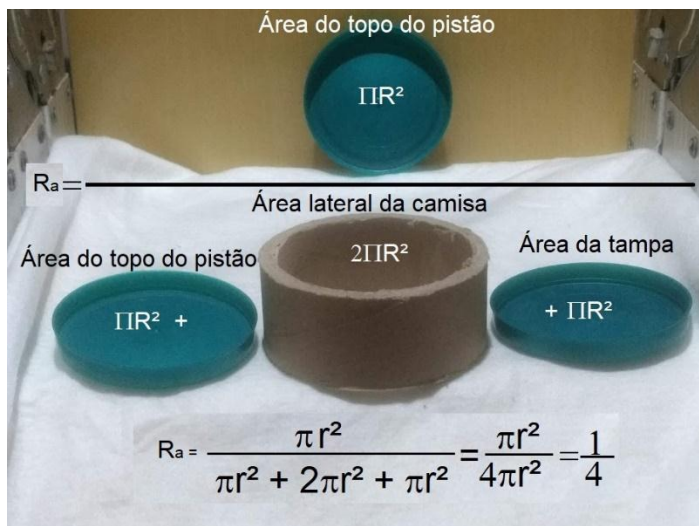


Figura 6. Representação fator área de colisão

Outra possibilidade explorada foi uma alternativa para suplementar a ausência de um motor real. Ensinar a desenvolver as imagens dos motores por ciclos e depois animar os movimentos cíclicos através de Gifs foi então adotada. Existem vários programas que ajudam na criação deste tipo de ilustração é uma forma lúdico/tecnológica para desenvolver o assunto da termodinâmica envolvida nos motores.

É importante utilizar recursos tecnológicos para auxiliar na construção dos conceitos a serem ensinados, como podemos extrair de:

Em um mundo cada vez mais globalizado, utilizar as novas tecnologias de forma integrada ao projeto pedagógico é uma maneira de se aproximar da geração que está nos bancos escolares. A tecnologia não é um enfeite e o professor precisa compreender em quais situações ela efetivamente ajuda no aprendizado dos alunos.(...) O uso das TICs facilita o interesse dos alunos pelos conteúdos, pois estamos falando de diferentes tecnologias digitais, portanto de novas linguagens, que fazem parte do cotidiano dos alunos e das escola (...). (Almeida 2000 p. 32).

Permitimos então que os estudantes fossem os protagonistas nesta etapa. Algumas afirmaram haver alguns aplicativos de celular, que fazem animações. Outras, disseram que é possível fazer os desenhos em sequência e gravar pelo celular. Uma estudante mais entusiasmada considerou ser possível realizar desenhos utilizando o programa *PAINT* da plataforma Windows, disse ainda que

poderia editar as imagens e fazer quadro a quadro e depois gravar com o programa “CAMTASIA”. Outro programa usado é o navegador para rodar os “Gifs” e se chama “DINIZGIFANIMATOR” e com ele é possível determinar a quantidade de quadros do movimento, o tempo da animação e velocidade. Na figura 7 apresentamos um Gif construídos pelos alunos

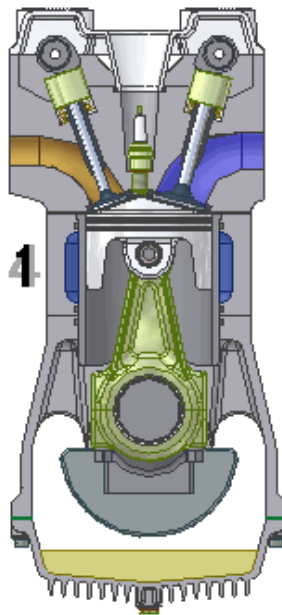


Figura 7 Gif motor Otto

A construção do “Gif” torna o trabalho mais significativo por conta da visualização do funcionamento dos motores e o que acontece microscopicamente em função do rendimento de cada motor.

Paralelamente a este trabalho as estudantes foram incentivadas a participar da feira de ciências denominada de “O ciclone do saber”, figura 8. Nesta feira são desafiados a expor trabalhos sobre temas indicados pelos professores dos componentes curriculares de física, química, biologia e matemática. Esta apresentação de trabalhos, que hoje é apenas referente as Ciências da Natureza e Matemática, acontece desde 2010, após a reconstrução da escola, após um intenso ciclone extratropical que danificou as estruturas físicas da escola. A cada ano que passa o projeto pedagógico fica mais aprimorado, criativo e organizado.

Cada professor poderia, caso os grupos precisassem e quisessem, orientar os alunos no desenvolvimento dos seus projetos. Sendo então, o presente projeto apresentado por dois grupos. Um deles se preocupou em explicar o funcionamento

dos motores e o outro grupo do curso normal, minhas alunas de física o ranking do rendimento dos motores.



The image shows a promotional flyer for a science fair. At the top left, it features the logo of the Instituto Estadual de Educação Barão de Tramandaí. The main title is 'MOSTRA DE TRABALHOS CIENTÍFICOS REALIZADOS NAS ÁREAS DA CIÊNCIAS DA NATUREZA E MATEMÁTICA'. Below this, it lists the exhibitors: 'Alunos do Ensino Médio', 'Alunos do Curso Normal', and 'Alunos do 9º ano do Ensino Fundamental'. The event is scheduled for June 15, 2018, at 9 AM, at the Ginásio de Esportes Clube Beira Mar. The flyer also includes a graphic of a stylized figure holding a globe, with the text 'Ciclone do Saber' and '15 de junho de 2018 9 horas'.

Instituto Estadual de Educação
Barão de Tramandaí

Convida para o

Ciclone do Saber

MOSTRA DE
TRABALHOS
CIENTÍFICOS
REALIZADOS NAS
ÁREAS DA CIÊNCIAS
DA NATUREZA E
MATEMÁTICA

Expositores:

- > Alunos do Ensino Médio
- > Alunos do Curso Normal
- > Alunos do 9º ano do Ensino Fundamental

Local e horário:

Ginásio de Esportes
Clube Beira Mar
Dia: 15/06/18
Horário: das 9h às 11h 30min
e das 13h às 16h

15 de junho de 2018
9 horas

Figura 8 Folder de divulgação da feira de ciências

A feira aconteceu no dia 15/06/2018 e teve a participação de toda a comunidade escolar da cidade com a apresentação de 70 trabalhos. Na oportunidade as alunas utilizaram o motor seccionado da moto para demonstração, além de produzirem uma maquete autoral, com garrafas pet simulando um motor de 4 cilindros. Evidenciaram o rendimento dos motores a combustão e o ranking com relação aos motores Otto de 2 e 4 tempos, Diesel, Wankel e o elétrico.

O outro grupo comparou o rendimento dos principais motores a combustão com o motor elétrico evidenciando a superioridade econômica em se tratando de eficiência energética, como também o impacto ambiental comparado com os que utilizam combustíveis fósseis.



Figura 9. A termodinâmica na Mostra de Trabalhos

O evento através da exposição dos trabalhos, valorizaram o aluno como protagonista e não como mero espectador. Dentro da sala de aula, o professor deve ser um mediador entre o conhecimento e o aluno, neste caso em especial com pesquisas nos campos de física, biologia, química e matemática.

10 – Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

Embora a Mecânica Estatística seja considerada um tópico avançado da Física, a introdução de noções preliminares dessa disciplina no ensino médio se torna viável, desde que seja adotado como ponto de partida um tema concreto e direcionado a aplicações práticas. No trabalho proposto, o funcionamento dos motores ciclo Otto é elucidado ao utilizar animações, modelos artesanais e até mesmo um motor seccionado, a fim de que o aluno adquira inicialmente certo grau de familiaridade com o tema. Nessa fase do estudo, o aluno passa a conhecer os principais componentes de um motor e suas funções, além de estabelecer contato informal com profissionais da área. A seguir, a introdução de um modelo matemático simplificado, baseado apenas em argumentos geométricos, é efetuada com o intuito de elucidar os processos responsáveis pelo baixo rendimento do motor. Ao perceber que apenas uma fração das colisões entre as moléculas e as paredes da câmara realmente contribuem para o movimento do motor, e que o ângulo de incidência das moléculas que atingem o topo do pistão também deve ser considerado no cálculo do rendimento, o aluno passa a perceber a importância de temas relacionados ao cálculo de probabilidades e à análise vetorial. Além disso, o aluno também passa a identificar, na prática, limitações da linguagem corrente, que podem converter discussões inicialmente objetivas em meros embates semânticos. A partir desse ponto, torna-se possível reconhecer a necessidade de utilizar modelos matemáticos para descrever cenários físicos mesmo em discussões preliminares.

A abordagem de Landau e o roteiro de Feynman contribuíram significativamente para o desenvolvimento do texto e dos modelos matemáticos propostos. O costume de utilizar hipóteses fracas e teorias mais fundamentais, ainda que fossem considerados temas avançados, permitiu a identificação dos fatores geométricos essenciais para a obtenção de estimativas de rendimento. O roteiro iterativo de Feynman contribuiu para simplificar a apresentação da disciplina de Mecânica Estatística e orientou o processo de refinamento do modelo, conservando sua simplicidade essencial. Sem a combinação dessas duas estratégias, em certo sentido complementares, a formulação certamente não resultaria ao mesmo tempo simples e realista.

Como recomendação para trabalhos futuros, essa estratégia poderia ser utilizada para formular modelos e produtos educacionais para aplicações em

Química. Nessa área específica da Física, a necessidade de concretizar conceitos através de recursos visuais e analogias elucidativas é ainda mais premente do que no trabalho proposto. Nesse caso, o material didático se encontra ainda em fase incipiente de desenvolvimento, enquanto os sistemas profissionais de simulação requerem o uso de equipamentos de alto desempenho computacional, que por seu altíssimo custo não estão disponíveis nas escolas secundárias.

11 – Bibliografia

FELSAGER, Bjorn. **Gemetry, Particles and fields**. 1^a ed. New York: editora Springer, 1998.

ZUBAREV D. N., **Nonequilibrium Statistical Thermodynamics**, 3^a. ed, Moscou Consultants Bureau, 1973.

ANDREWS, Frank C. **Equilibrium statistical mechanics**, 1^a ed. New York, Wiley, 1963

ALMEIDA, M. E. B. **Formação de professores**. Brasília: Ministério da Educação, 2000.

MORAN, José Manuel. *Mudanças na comunicação pessoal*; **Gerenciamento integrado da comunicação pessoal, social e tecnológica**. São Paulo, Paulinas, 1998.

VIGOTSKY, L.S. **A Formação Social da Mente**. São Paulo: Livraria Martins Fontes Editora Ltda, 1998.

FEYNMAN, R.P. **Sobre as Leis da Física**. Rio de Janeiro, Livraria Contraponto, Ed. PUC-Rio, 2012.

LANDAU, L.V. **Física para todos**, Moscou, Editorial MIR, 1963.

FEYNMAN, R.P. **Física Em Seis Lições**. Rio de Janeiro, Ediouro, 1999.

APENDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL



MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



PRODUTO EDUCACIONAL

**ENSINANDO TERMODINÂMICA E MECÂNICA ESTATÍSTICA: ESTIMATIVAS
PARA O RENDIMENTO DOS MOTORES DE CICLO OTTO.**

Sérgio Moacir Job Lima

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal
Orientador

Prof. Dr. Ederson Staudt
Coorientador

Tramandaí
Março de 2019

Resumo

Neste trabalho apresentamos um produto educacional resultado dos esforços com enfoque no ensino de aspectos da física envolvida nos motores de ciclo Otto, de quatro tempos, mais especificamente o cálculo do rendimento termodinâmico e conceitos relacionados. O produto educacional é uma sequência didática que inicia com a enquete com técnicos mecânicos automotivos de Tramandaí /RS, onde se busca compreender o conhecimento destes no que se refere aos conceitos da termodinâmica com a posterior visualização do funcionamento do motor real, verticalmente seccionado, e se complementa com a elaboração do modelo matemático, baseado em argumentos geométricos, capaz de fornecer uma previsão bastante robusta sobre o rendimento. A aplicação deste produto educacional foi feita com duas turmas de 60 alunas, entre 14 e 17 anos, do primeiro ano do Curso Normal do Instituto Estadual de Educação Barão de Tramandaí.

1 – Introdução

A termodinâmica é uma disciplina central quando se trata do estudo da física, isto é, ela é encontrada em diversos períodos escolares, tanto no ensino médio bem como em cursos de graduação em física ou em áreas afins. Além disso possui papel de aplicabilidade tecnológica de importância em várias áreas das engenharias e na química. Em princípio, ela introduz conceitos que não são encontrados na mecânica ou no eletromagnetismo como, por exemplo, os conceitos de temperatura e calor.

Uma crítica, bastante recorrente, no que se refere ao ensino da física de um modo geral, é o fato de que ela está distante do dia a dia de quem a estuda e a sua demasiada abstração não motivada em termos da realidade. Vários são os efeitos nocivos disso no que se objetiva que é uma aprendizagem efetiva.

No que diz respeito ao caso específico da termodinâmica é possível encontrar problemas adicionais. Por exemplo, o conceito de máquina de calor ou térmica, assim como era comum na época do estabelecimento dos fundamentos da termodinâmica, não são corriqueiras na atualidade, então, referir-se a estes sistemas, é de fato bastante abstrato e requer no estudante a construção de cenários imaginários que são difíceis de serem alcançados em virtude da falta de uma possibilidade de confrontação real. Em substituição a isso tenta-se ainda, equivocadamente, considerar os motores a combustão como máquinas térmicas.

Isso na verdade serve apenas para introduzir problemas adicionais: um motor a combustão não pode, em hipótese alguma, se respeitadas as hipóteses da termodinâmica de equilíbrio, ser considerado uma máquina térmica. Isso por si só é argumento suficiente para estabelecer que não faz o menor sentido tratar um motor a combustão em termos da termodinâmica de equilíbrio. Mesmo que assim não o fosse, se o estudante não conhecer a constituição de um motor e o papel que cada um dos seus componentes desempenha para que o funcionamento se torne possível, a consideração do mesmo continua sendo fantasmagórica. De outra maneira, mesmo que a presença dos motores a combustão, em várias aplicabilidades, seja facilmente reconhecida, o mesmo não pode ser considerado conhecido quanto ao seu funcionamento, o que quer dizer que não significa que as partes essenciais, que participam efetivamente do processo são conhecidos. Por exemplo, não necessariamente o estudante saiba o que é um pistão ou uma camisa, e o papel que cada um desempenha no funcionamento do motor. Associar tais termos aos conceitos termodinâmicos requer então habilidade de abstração elevada e desnecessária tendo em vista que ela pode ser facilmente suplementada por um motor real.

Através de uma enquete direcionada a mecânicos de oficinas automotivas da cidade, elencamos possíveis concepções apresentadas no que se refere as possíveis causas que contribuem com a diminuição do rendimento termodinâmico destes motores. Embora um grande número de profissionais experientes aponte facilmente diversos fatores a razão primordial não é identificada. Isso em parte se explica pela ausência dos conhecimentos dos conceitos necessários e em razão das discussões que são conduzidas apenas em nível qualitativo. Neste sentido, também é possível verificar nos livros didáticos de física que em sua maioria utilizam como exemplo de rendimento termodinâmico o ciclo dos motores Otto quando estão considerando conceitos da termodinâmica clássica, o que é, conceitualmente inconsistente. Para ilustrar o funcionamento destes motores as estudantes desenvolveram um GIF apresentando o movimento principais movimentos e a transformação de energia térmica em mecânica. A fim de eliminar lacunas do conhecimento, promovendo o aprendizado significativo, constituímos um motor de moto CG 125cm³ seccionado, para servir como instrumento pedagógico para a

visualização dos diferentes estágios do processo de combustão e a formulação conceitual associada a cada etapa.

Elaboramos assim um produto educacional composto por: um material instrucional para os professores de diferentes níveis de ensino que permite ensinar conceitos de termodinâmica clássica além de introduzir em um nível bastante básico, porém completo elementos da mecânica estatística; como ferramenta pedagógica propomos um motor de combustão de quatro tempos verticalmente seccionado e a proposta de construção de um conjunto de Gif's, por parte dos estudantes, para o fechamento do ciclo de ensino.

O cenário e a enquete

Quando se trata do ensino de uma área de conhecimento regido pela lógica é requisito primordial de que todos os elos entre os conceitos definidos sejam de alguma maneira construídos para que sejam integrados na estrutura cognitiva de quem a estuda. Além disso, no que se refere ao caso particular dos conceitos termodinâmicos envolvidos no funcionamento de um motor de ciclo Otto é preciso ainda que o estudante saiba o que é e para que serve cada um dos componentes mecânicos constituintes do mesmo.

Inicialmente detectamos essa falta de linguagem técnica específica necessária para alicerçar a aprendizagem dos conceitos de termodinâmica e principalmente o não conhecimento do que é e para que serve cada componente mecânico do motor. Inicialmente detectamos que alguns estudantes em nível de pós-graduação (colegas do autor) evidenciaram, em virtude da ausência da linguagem técnica, uma não compreensão, das partes mecânicas, desejada para uma aula de termodinâmica, como a proposta aqui. Tendo em vista a proposta de ensino para turmas do ensino médio, o raciocínio subsequente ocorre no mesmo sentido: se tal linguagem falta em estudantes em nível de mestrado o que esperar de um cenário caracterizado por estudantes do ensino médio? Para que esse cenário pudesse ser alcançado realizamos, com as duas turmas alvo uma sondagem inicial para avaliar os conhecimentos prévios e acerca de conceitos de domínio da linguagem mecânica. Percebemos que os conhecimentos se mostraram em nível rudimentar, isto é, mesmo reconhecendo que todos os carros, motos e similares tinham em sua constituição um motor, não se verificou a presença de

informações adicionais necessárias para considerações de seu funcionamento. Entretanto, temos pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), a preconização de que (BRASIL, 1997, p. 21):

...numa sociedade em que se convive com a supervalorização do conhecimento científico e com a crescente intervenção da tecnologia no dia a dia, não é possível pensar na formação de um cidadão crítico à margem do saber científico.

Nesta esteira de raciocínio pode ser colocada como hipótese de que isso se restringia apenas a ambientes escolares.

Neste sentido elaboramos uma questão que, apesar de ser muito simples, possui um papel muito importante no que se refere ao ensino de uma física mais realista: Na sua concepção quais fatores contribuiriam para o desperdício e, conseqüentemente, afetaria o rendimento dos motores ciclo Otto a gasolina? Esta questão tinha dupla finalidade, uma delas era a de verificar se é como os conceitos científicos, relacionados a termodinâmica, estariam presentes em pessoas que manipulam equipamentos onde estas leis se fazem plenamente presentes. Escolhemos assim um conjunto de especialistas mecânicos que trabalham em oficinas mecânicas na cidade de Tramandaí/RS, pois nestes a linguagem da parte mecânica estaria bem fundamentada. O segundo objetivo foi fazer com que as estudantes se deslocassem até as oficinas locais para que pudessem estabelecer intimidade com o assunto por meio de conversas com os especialistas mecânicos. Estas conversas eram então guiadas por um questionário, cujo tema central girava em torno do rendimento dos motores de ciclo Otto. Com isso realizamos o levantamento dos conhecimentos específicos dos mecânicos acerca de conceitos referentes a termodinâmica. O leitor já familiarizado com noções básicas de Termodinâmica poderia eventualmente criticar a iniciativa de promover uma enquete com os profissionais da mecânica automotiva. Esse leitor poderia alegar que não se pode esperar de pessoas sem formação em Termodinâmica Clássica que sejam capazes de encontrar as causas primárias do baixo rendimento dos motores ciclo Otto. Acontece que, se os mecânicos passaram pela escola e tiveram contato com a Física era de se esperar que algum fragmento do que se estuda nessas etapas estaria presente. Evidentemente, essa alegação se baseia na falsa premissa de que a própria Termodinâmica Clássica fornece subsídios para que essas causas sejam de fato identificadas. Contudo, a aplicação da Termodinâmica Clássica a problemas

envolvendo processos de combustão é extremamente limitada, como desenvolvemos detalhadamente na dissertação associada ao produto educacional.

2. O motor verticalmente seccionado e a construção dos Gif's

Um objeto real pode se tornar uma ferramenta pedagógica importante na adequada condução dos esforços para compreender determinada situação e a sua correta modelagem física. Usualmente os livros didáticos (Veja Fig.1) apresentam em figuras esquemas que representam as principais partes do motor, como por exemplo em Beatriz pag. 129, cabe então ao professor explicar a função de cada um dos constituintes e descrever o cenário dinâmico de seu funcionamento. Ao aluno cabe então criar cenários dinâmicos imaginários para visualizar mentalmente o funcionamento por completo.

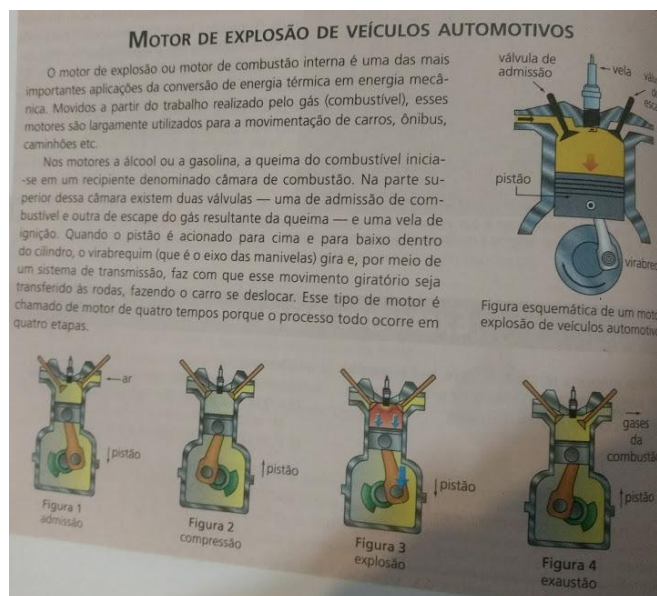


Figura 1 motor em livros didáticos

Acreditamos que uma tal abordagem faz com que o estudante dispenda esforços desnecessariamente em aspectos de funcionamento estrutural que poderiam ser facilmente suplementados por uma visualização prática de fato realista, ou seja, por algum mecanismo que realmente funcione nos moldes da representação ilustrativa do livro didático, permitindo assim que os estudantes se concentrem no que realmente interessa: a aprendizagem significativa dos conceitos envolvidos na descrição dos processos físicos.



Figura 2 motor verticalmente seccionado

Aliado ao que acabamos de ressaltar, o material instrucional acima apresenta considerações em relação as limitações da Termodinâmica Clássica na descrição de aspectos termodinâmicos envolvidos nos motores a combustão de ciclo Otto e, em contrapartida, apresentamos a formulação de um modelo matemático inédito capaz de alcançar previsões robustas quanto ao seu rendimento. Tal material instrucional teve seus principais aspectos implementados por intermédio do uso de uma ferramenta pedagógica potencialmente significativa composta por um motor de quatro tempos verticalmente seccionado, movido a gasolina, que antes do seu descarte era parte integrante de uma motocicleta. O seccionamento, como pode ser verificado na figura 2 foi desenhado de modo que se possa visualizar as partes mecânicas essenciais para a consideração do processo de combustão e a correta modelagem.

Ao virabrequim desse motor encontra-se acoplado uma manivela para que seja possível introduzir os movimentos de rotação para visualização do movimento de cada uma das partes em cada um dos tempos e a correta descrição em termos do processo termodinâmico correspondente. O Motor também se encontra suportado por uma base móvel porém desmontável, veja figura 3, para que seja possível relacioná-lo de 360° em um plano horizontal, isso se faz necessário, em vista do motor utilizado, para que se consiga visualizar de um dos lados os movimentos do pistão dentro da camisa e do outro lado as varetas que acopladas ao virabrequim são responsáveis pela abertura e fechamento das válvulas de admissão e exaustão.



Figura 3 manivela do motor

Esse tipo de montagem atribui uma grande versatilidade; ao mesmo tempo em que o professor pode monopolizar as explicações/demonstrações permite também que o estudante interaja, individualmente ou em grupos, diretamente com o artefato em estudo. Como por exemplo, agora o estudante não precisa criar uma imagem sobre o que é um pistão, ele pode simplesmente tocá-lo e verificar in loco o papel desempenhado no funcionamento do motor. Além disso pode-se utilizar esse tipo ferramenta pedagógica para motivar os estudantes no que se refere a aplicação tecnológica dos conhecimentos científicos produzidos, isto é, a existência de um motor a combustão capaz de colocar em movimento carros, motocicletas, etc. Ou seja, esses tipos de abordagens são parte integrante da resposta à pergunta que quem estuda determinado assunto se faz: “para que serve” ou “onde vou usar isso”?

Após as considerações das limitações conceituais da Termodinâmica Clássica e a apresentação do modelo matemático tomando como cenário um objeto real onde estes fenômenos são encontrados é então chegado a hora da

consideração da produção dos Gif's por parte dos alunos. A esta parte pode se atribuir duas finalidades: o acompanhamento, por parte do Professor, da aprendizagem construída pelos estudantes e um incentivo para que os estudantes produzam algum material próprio que simule as imagens estáticas encontradas nos livros didáticos e que os estimule a manipular tecnologias com fins de produção de material didático próprio.

3. Programa para estimar a fração da energia térmica desperdiçada pelo lançamento de gases aquecidos na atmosfera

Com o objetivo de refutar os argumentos relacionados ao baixo rendimento dos motores automotivos, apresentados pelos especialistas mecânicos na enquete, acima, desenvolvemos um código fonte, redigido em Maple, cujos resultados foram discutidos com os estudantes. O programa a seguir pode ser utilizado para demonstrar que as perdas energéticas oriundas da emissão de gases quentes pelo cano de descarga são desprezíveis em relação ao poder calorífico da gasolina.

> **restart:**

Poder calorífico da gasolina

> **pc:=9600000*4.18;**

pc := 0.401280000010⁸

Para 1kg de combustível (aprox 10 mois) são necessários 10 mois de O₂ (queima estequiométrica), que equivalem a 320g. Então, cada kg de combustível produz aproximadamente 1,32kg de gases de escape:

> **m:=1.32;**

m := 1.32

> **Cp:=1000;**

Cp := 1000

A diferença típica entre as temperaturas dos gases de escape e da atmosfera é

> **dt:=800-300;**

dt := 500

A quantidade de energia térmica liberada para a atmosfera pelos gases de escape é então

> $q := m \cdot C_p \cdot dt;$

$$q := 660000.00$$

Sendo que a fração da energia desperdiçada é dada por: $q/\text{poder calorífico do combustível}$

> $perda := q/pc;$

$$perda := 0.01644736842$$

Assim, apenas 1,6% do poder calorífico do combustível é desperdiçado ao emitir gases quentes (a 800K) para a atmosfera.

3 Programa para estimar o rendimento do motor

Este código fonte, também redigido em Maple, estima o rendimento do motor ciclo Otto empregando a formulação integral que pode ser acompanhado em mais detalhes no capítulo 7 da dissertação.

Estimativa para o rendimento de motores ciclo Otto

> **restart;**

Contribuição para o rendimento do motor devido à área efetiva de colisão

> $Ra := \pi \cdot r^2 / (2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (c - y));$

$$Ra := \frac{\pi r^2}{2 \pi r^2 + 2 \pi r (c - y)}$$

> **simplify(Ra);**

$$\frac{r}{2(r + c - y)}$$

> $Ra := 1/2 / (1 + (c - y) / r);$

$$Ra := \frac{1}{2 \left(1 + \frac{c - y}{r} \right)}$$

Contribuição relativa ao ângulo de incidência das moléculas que colidem com o topo do pistão

> $Ri := .7;$

$$Ri := 0.7$$

Valor local do percurso entre intre interfaces sólidas, junto ao ponto morto inferior

> **lpi:=c;**

$$lpi := c$$

Valor local do percurso entre intre interfaces sólidas, junto ao ponto morto superior

> **lps:=c/tc;**

$$lps := \frac{c}{tc}$$

Frequência com a qual ocorrem colisões com o topo do pistão nos pontos extremos do curso:

> **fpi:=vpi/lpi;**

$$fpi := \frac{vpi}{c}$$

> **fps:=vps/lps;**

$$fps := \frac{vps \ tc}{c}$$

Contribuição da frequência para o rendimento, em função da posição do pistão

> **Rf:=fpi+(fps-fpi)*y/c;**

$$Rf := \frac{vpi}{c} + \frac{\left(\frac{vps \ tc}{c} - \frac{vpi}{c}\right) y}{c}$$

Simplificando a expressão resultante

> **Rs:=Ri*Ra;**

$$Rs := \frac{0.3500000000}{1 + \frac{c - y}{r}}$$

A contribuição do rendimento devido à frequência é utilizada para compor a função peso para a avaliação do rendimento total ao longo do curso.

Fator de normalização da função peso (tc é a taxa de compressão da câmara)

> **sw:=int(Rf,y=0..c);**

$$sw := vpi + \frac{\left(\frac{vps \ tc}{c} - \frac{vpi}{c}\right) c}{2}$$

Função peso já normalizada

> **w:=simplify(Rf/sw);**

$$w := \frac{2(tc \ vps \ y + c \ vpi - vpi \ y)}{c^2 (tc \ vps + vpi)}$$

Integral que define o rendimento como média ponderada entre os valores locais

```
> num:=subs (y=c, int (Rs*w, y)) -subs (y=0, int (Rs*w, y)) :
```

Rendimento resultante

```
> eta:=simplify (num) ;
```

$$\eta := -0.700000000000r (\ln(-r) tc vps c + r \ln(-r) tc vps - \ln(-1. r - 1. c) tc vps c - r \ln(-1. r - 1. c) tc vps - r \ln(-r) vpi + r \ln(-1. r - 1. c) vpi + c tc vps - vpi c) / (c^2 (tc vps + vpi))$$

Lista de parâmetros numéricos

```
> l0:={r=.05, c=.1, lpi=c, lps=lpi/tc, vps=600, vpi=300, tc=11} :
```

Substituição da lista para estimar valores numéricos para o rendimento

```
> eta0:=evalf (subs (l0, eta)) ;
```

$$\eta_0 := 0.2237702078 + 0. I$$

Rendimento ideal

```
> evalf (1-800/2300) ; 0.6521739130
```

8 – Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

Embora a Mecânica Estatística seja considerada um tópico avançado da Física, a introdução de noções preliminares dessa disciplina no ensino médio se torna viável, desde que seja adotado como ponto de partida um tema concreto e direcionado a aplicações práticas. No trabalho proposto, o funcionamento dos motores ciclo Otto é elucidado ao utilizar animações, modelos artesanais e até mesmo um motor seccionado, a fim de que o aluno adquira inicialmente certo grau de familiaridade com o tema. Nessa fase do estudo, o aluno passa a conhecer os principais componentes de um motor e suas funções, além de estabelecer contato informal com profissionais da área. A seguir, a introdução de um modelo matemático simplificado, baseado apenas em argumentos geométricos, é efetuada com o intuito de elucidar os processos responsáveis pelo baixo rendimento do motor. Ao perceber que apenas uma fração das colisões entre as moléculas e as paredes da câmara realmente contribuem para o movimento do motor, e que o ângulo de incidência das moléculas que atingem o topo do pistão também deve ser considerado no cálculo do

rendimento, o aluno passa a perceber a importância de temas relacionados ao cálculo de probabilidades e à análise vetorial. Além disso, o aluno também passa a identificar, na prática, limitações da linguagem corrente, que podem converter discussões inicialmente objetivas em meros embates retóricos. A partir desse ponto, torna-se possível reconhecer a necessidade de utilizar modelos matemáticos para descrever cenários físicos mesmo em discussões preliminares.

A abordagem de Landau e o roteiro iterativo de Feynmann contribuíram significativamente para o desenvolvimento do texto e dos modelos matemáticos propostos. O costume de utilizar hipóteses fracas e teorias mais fundamentais, ainda que fossem considerados temas avançados, permitiu a identificação dos fatores geométricos essenciais para a obtenção de estimativas de rendimento. O roteiro de Feynmann contribuiu também para simplificar a apresentação da disciplina de Mecânica Estatística, e orientou o processo de refinamento do modelo, conservando sua simplicidade essencial. Sem a combinação dessas duas estratégias, em certo sentido complementares, a formulação certamente não resultaria ao mesmo tempo simples e realista.

Como recomendação para trabalhos futuros, essa estratégia poderia ser utilizada para formular modelos e produtos educacionais para aplicações em Química. Nessa área específica da Física, a necessidade de concretizar conceitos através de recursos visuais e analogias elucidativas é ainda mais premente do que no trabalho proposto. Nesse caso, o material didático se encontra ainda em fase incipiente de desenvolvimento, enquanto os sistemas profissionais de simulação requerem o uso de equipamentos de alto desempenho computacional, que por seu altíssimo custo não estão disponíveis nas escolas secundárias.

Bibliografia

Plano Nacional do Livro e do Material didático, <http://www.fnde.gov.br/programas/programas-do-livro/livro-didatico/escolha-pnld-2019>, acesso em 24/09/2018.

MÁXIMO, Antônio ; Alvarenga, Beatriz . **Física 2**, Scipione (2006).

VIEIRA, Edimara Fernandes, Camargo, Sérgio, **Livro Didático no Ensino de Física: desafios e potencialidades**, EDUCEERE, 2013.

MORAES, J.U.P. ,**O Livro Didático de Física e o Ensino de Física: suas relações e origens**, Scientia Plena, vol. 7, (2011).

FERREIRA, Marcia Serra, Selles, Sandra Escovedo, **A produção acadêmica Brasileira Sobre Livros Didáticos em Ciências: uma análise em periódicos nacionais**, IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências.

Dos Reis, Wendel Fajardo, Martins, Maria Inês, **Experimentos em Livros Didáticos de Física: Uma Análise Comparativa de duas Edições PNLD**, Imagem da Educação, v. 5, n. 3, p. 01-09, 2015.