

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufscar** Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**ENSINO DE CONCEITOS BÁSICOS DE
TERMODINÂMICA UTILIZANDO UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA**

ALEXANDRE SBRISSA MATEAZZO

ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA

Sorocaba - SP
Abril de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**ENSINO DE CONCEITOS BÁSICOS DE
TERMODINÂMICA UTILIZANDO UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA**

ALEXANDRE SBRISSA MATEAZZO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.
Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza.

Sorocaba - SP
Abril de 2021

Mateazzo, Alexandre Sbrissa

Ensino de conceitos básicos de Termodinâmica
utilizando um motor de combustão interna / Alexandre
Sbrissa Mateazzo -- 2022.
138f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São
Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): James Alves de Souza

Banca Examinadora: Johnny Vilcarromero Lopez,
Frederico Augusto Toti

Bibliografia

1. Termodinâmica. 2. Motor de 4 tempos. 3. Ensino de
física. I. Mateazzo, Alexandre Sbrissa. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alexandre Sbrissa Mateazzo, realizada em 12/04/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. James Alves de Souza (UFSCar)

Prof. Dr. Johnny Vilcarromero Lopez (UFSCar)

Prof. Dr. Frederico Augusto Toti (UNIFAL - MG)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Daniela Cristina Saggion por sempre me ajudar a superar meus limites e aos meus filhos Guilherme, Camila e Bianca, pela paciência e sacrifício durante todo este percurso e a todos que de forma direta ou indireta me ajudaram e me incentivaram a não desistir nunca.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por tudo na minha vida e ao meu pai Antônio de Jesus Mateazzo e minha mãe Nerina Leonice Mateazzo, que se não fosse pelos esforços deles eu provavelmente não teria chegado a ter a vida que tenho hoje e com certeza estão orgulhosos da minha trajetória. Agradeço também à minha Tia e Madrinha Diva Sbrissa por sempre olhar por mim.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

Agradeço ao Prof. Dr. James Alves de Souza pela orientação, durante todo o percurso deste trabalho e pela atenção e paciência, sempre me incentivando a focar nos meus trabalhos e nunca desistir, que para mim foi de extrema contribuição para a minha formação e execução deste trabalho.

Agradeço à minha esposa Daniela Cristina Saggion que sempre me incentivou a continuar meus estudos e principalmente pela paciência durante minhas ausências durante horas de estudo. Agradeço ao meu filho Guilherme por me ajudar por diversas vezes durante este percurso e às minhas filhas Camila e Bianca por sempre me motivar a continuar meus trabalhos e nunca desistir.

Agradeço aos estudantes e à direção da escola em que foi aplicada a minha proposta.

Por fim, agradeço à todos os meus familiares, amigos e colegas do mestrado que sempre me incentivaram e me apoiaram nesta caminhada.

“Se, algum dia, a máquina a vapor (motor) for tão aperfeiçoada a ponto de ser construída e abastecida com combustível a baixo custo, esta combinará todas as qualidades desejáveis e proporcionará à indústria uma gama de possibilidades, cuja extensão é quase impossível de ser prevista.”

NICOLAS LÉONARD SADI CARNOT

RESUMO

MATEAZZO, Alexandre S. Ensino de conceitos básicos de Termodinâmica utilizando um motor de combustão interna. 2022. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2022.

O desenvolvimento de tecnologia tem introduzido mudanças significativas em nossas vidas, como na comunicação, economia, transportes, entretenimento e até mesmo na educação. Atualmente, estudantes e professores têm se deparado com desafios que podem modificar significativamente a forma de aprendermos e ensinarmos ciências. No ensino de Física, que é uma ciência que tem como metodologias a experimentação, a observação e as análises matemáticas, é impossível ignorar o tremendo impacto que a tecnologia pode ter nas novas gerações de estudantes. Neste trabalho exploramos o uso de tecnologia, através de um motor de combustão interna real, devidamente preparado para ser utilizado como material didático, para ensinar conceitos básicos de Termodinâmica como calor, trabalho, temperatura, energia, entropia, as Leis da Termodinâmica, máquinas térmicas, processos e ciclos termodinâmicos, entre outros, para alunos do ensino médio. Nosso produto educacional consiste de um tutorial contendo todos os detalhes para a preparação de um motor sucateado para ser utilizado em sala de aula e uma sequência didática sugestiva para a discussão do tema proposto, explicando o funcionamento do motor através do ciclo de Otto ideal. A aplicação do produto em sala de aula foi dividida em 3 atividades desenvolvidas em 4 aulas de 45 minutos. Inicialmente fizemos uma discussão geral sobre o tema utilizando um questionário discursivo contendo três questões norteadoras para explorar o conhecimento prévio dos alunos. Em seguida, os tópicos propostos foram desenvolvidos através de discussões e cálculos, todos complementados por demonstrações utilizando o motor real. O fechamento das atividades foi feito com um questionário de múltipla escolha contemplando os principais tópicos da Termodinâmica trabalhados. O produto foi aplicado para alunos do 2º ano do ensino médio de uma escola pública situada na cidade de Itu no interior de São Paulo, sendo muito bem recebido pelos estudantes e todos os tópicos propostos puderam ser amplamente discutidos no tempo previsto de maneira satisfatória.

Palavras-chave: Termodinâmica. Motor de 4 tempos. Ensino de Física. Ensino médio.

ABSTRACT

MATEAZZO, Alexandre S. Teaching basic concepts of Thermodynamics using an internal combustion engine. 2022. Dissertation (Master in Physics Teaching) - Federal University of São Carlos, Sorocaba *campus*, Sorocaba, 2022.

The development of technology has introduced significant changes in our lives, such as in communication, economy, transport, entertainment, even in education. Currently, students and teachers are faced with challenges that can significantly change the way we learn and teach science. In the teaching of Physics, which is a science whose methodologies are experimentation, observation and mathematical analysis, it is impossible to ignore the tremendous impact that technology can have on new generations of students. In this work we explore the use of technology, by using a real internal combustion engine, properly prepared to be used as teaching material, to teach basic concepts of Thermodynamics such as heat, work, temperature, energy, entropy, the Laws of Thermodynamics, thermal engines, processes and thermodynamic cycles, among others, for high school students. Our educational product consists of a tutorial containing all the details for the preparation of a scrapped engine to be used in the classroom and a suggestive didactic sequence for the discussion of the proposed theme, explaining the operation of the engine through the ideal Otto cycle. The application of the product in the classroom was divided into 3 activities developed in 4 lessons of 45 minutes. Initially we made a general discussion on the subject using an open-ended questionnaire containing three guiding questions to explore the students' prior knowledge. Then, the proposed topics were developed through discussions and calculations, all complemented by demonstrations using the real engine. The activities were closed with a multiple choice questionnaire covering the main topics of Thermodynamics worked on. The product was applied to 2nd year high school students from a public school located in Itu city, municipality of São Paulo. It was very well received by the students and all the proposed topics could be widely discussed in the allotted time in a satisfactory manner.

Keywords: Thermodynamics. Four-stroke engine. Physics teaching. High school.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1** – Foto ilustrativa do trator cortador de grama equipado com o mesmo modelo de motor que utilizamos para a elaboração do nosso produto educacional. 10
- Figura 3.2** – Foto do motor desmontado para a realização da limpeza, seleção das peças e adequação para ser utilizado em sala de aula como material didático. 10
- Figura 3.3** – Foto da carcaça do motor desmontado após a limpeza. 11
- Figura 3.4** – Foto mostrando uma parte do motor antes e depois do corte transversal feito na região superior do cilindro para facilitar a visualização do movimento do pistão do motor. 11
- Figura 3.5** – Foto da tampa de acrílico, à direita, confeccionada para tornar o interior da câmara de óleo do motor visível, conforme mostrado na foto à esquerda. Nesta parte encontram-se a maior parte dos componentes móveis do motor. O quadro vermelho mostra o corte feito na parte superior do cilindro, como mostrado na figura 3.4. Este corte é estendido à região do cabeçote, quadro verde, para facilitar a visualização da abertura das válvulas de admissão e exaustão do motor. 12
- Figura 3.6** – Foto das peças do motor pintadas em cores diferentes para facilitar a identificação e a visualização das mesmas durante o funcionamento do motor. 13
- Figura 3.7** – Fotos mostrando as marcações de fábrica das peças do motor para facilitar a sincronização do sistema. 14
- Figura 3.8** – À esquerda apresentamos uma imagem da manivela construída a partir de materiais reciclados e utilizada para facilitar a movimentação do motor durante as aulas. À direita é apresentado o parafuso utilizado para a fixação da manivela composto por uma chave de catraca quebrada (seta) soldada a um parafuso. 14
- Figura 3.9** – Volante contra peso acoplado na parte de trás do motor. 15
- Figura 3.10** – Fotos em diferentes ângulos do motor pronto para ser utilizado como material didático. 15
- Figura 3.11** – Fotos mostrando uma lâmpada de LED adaptada na carcaça de uma vela de ignição (superior esquerda) e o correspondente circuito elétrico acoplado ao motor (superior direita) utilizado para acionar a mesma e simular a ignição da mistura ar-combustível na câmara de combustão no momento em que o pistão comprime a mistura no cilindro. Abaixo mostramos a malha do circuito elétrico e os valores dos componentes utilizados. 16
- Figura 3.12** – Fotos mostrando as partes do motor de combustão interna utilizado neste trabalho, conforme a terminologia apresentada nesta seção. 21

- Figura 3.13** – Diagrama geral de uma máquina térmica, mostrando a energia Q_1 transferida da fonte quente à temperatura T_1 para o motor através de calor, a energia Q_2 dissipada pelo motor através de calor para a fonte fria à temperatura $T_2 < T_1$ e a energia mecânica W proveniente da conversão da energia térmica através de trabalho..31
- Figura 3.14** – Diagrama da pressão P em função do volume V para o Ciclo de Carnot. Este é composto por dois processos isotérmicos ab e cd , cujas isotermas são caracterizadas pelas temperaturas T_1 e T_2 das fontes quente e fria, respectivamente, e dois processos adiabáticos bc e da , em que $Q = 0$. A energia obtida da fonte quente no processo ab através de calor é Q_1 e a energia dissipada para a fonte fria no processo cd é dada por Q_2 . A área cinza do ciclo fechado representa a quantidade de energia térmica convertida em energia mecânica W através de trabalho. As isotermas plotadas são do tipo $PV = k(T)$ e as adiabáticas $PV^\gamma = k(S)$, sendo S a entropia. O coeficiente adiabático utilizado foi $\gamma = 5/3$, característico para gases monoatômicos ideais. 35
- Figura 3.15** – Diagrama PV do ciclo de trabalho de Otto ideal, mostrando os 6 processos termodinâmicos que representam aproximadamente o funcionamento do motor de combustão interna que utilizamos. Os processos apresentados são: Oa – admissão da mistura ar-gasolina; ab – compressão adiabática da mistura; bc – ignição da mistura (fonte quente), provocando uma compressão isovolumétrica; cd – expansão adiabática dos gases provenientes da combustão da mistura; da – descompressão da câmara pela abertura da válvula de exaustão (fonte fria) e aO – exaustão. As isotermas (curvas tracejadas pontilhadas) que passam pelos pontos b e d mostram que $\theta_b < \theta_d$. Estas e as adiabáticas são do mesmo tipo que aquelas apresentadas na figura 3.14. 40
- Figura 3.16** – Os quatro tempos do motor de combustão interna utilizado, descritos pelas setas vermelhas, conforme os processos termodinâmicos do ciclo de Otto ideal apresentado na figura 3.15. 41
- Figura 3.17** – Fotos mostrando o duto de admissão na cor azul à esquerda, o duto de exaustão em vermelho no centro, pintados para fornecer uma representação visual para os estudantes das menores e maiores temperaturas, respectivamente, do ciclo de Otto. Os balancins à direita também foram pintados nas respectivas cores, pois são responsáveis pela abertura das válvulas de admissão (inferior à esquerda) e exaustão (inferior no centro). 43
- Figura 4.1** – Gráfico mostrando a porcentagem de respostas corretas e incorretas da primeira questão do questionário aplicado ao final da atividade 1, sobre o conceito de temperatura. 15 estudantes responderam essa questão..... 58
- Figura 4.2** – Gráfico mostrando a porcentagem de respostas corretas, parcialmente corretas e incorretas da segunda questão do questionário aplicado ao final da atividade 1, sobre o conceito de calor. 19 estudantes responderam essa questão..... 59

- Figura 4.3** – Gráfico mostrando a porcentagem de respostas corretas, parcialmente corretas e incorretas da terceira questão do questionário aplicado ao final da atividade 1, sobre máquinas térmicas. 19 estudantes responderam essa questão. 60
- Figura 4.4** – Gráfico mostrando o número e a porcentagem de respostas corretas e incorretas das 10 questões do questionário final, Q1 a Q10. 14 alunos responderam o questionário. 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SI – *Sistema Internacional de Unidades*

MNPEF – *Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física*

PROFIS-So – *Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.*

COVID-19 - *É uma doença infecciosa causada pelo vírus SARS-CoV-2.*

PMS – *Ponto Morto Superior.*

PMI – *Ponto Morto Inferior.*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 A CIÊNCIA E A TECNOLOGIA	4
2.2 O USO DE TECNOLOGIAS PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS	6
2.2.1 Ensinando Termodinâmica com o auxílio de Tecnologias.....	6
CAPÍTULO 3 - PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
3.1 PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	9
3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.2.1 Breve histórico sobre o motor de combustão interna.....	17
3.2.1.1 Classificação dos motores de combustão interna	19
3.2.2 A Termodinâmica e o Movimento Térmico	22
3.2.3 Definição de temperatura, calor, trabalho e energia.....	23
3.2.4 A Primeira Lei da Termodinâmica	26
3.2.5 Máquinas térmicas e a Segunda Lei da Termodinâmica	29
3.2.5.1 Ciclo de Carnot e a eficiência de máquinas térmicas	29
3.2.5.2 Entropia	37
3.2.5.3 Os quatro tempos do motor utilizado e o ciclo de Otto	39
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO	46
4.1 SEQUÊNCIA DIDÁTICA	46
4.1.1 Atividade 1: Levantamento do conhecimento prévio dos estudantes	47
4.1.2 Atividade 2: Discussão dos conceitos de Termodinâmica com o uso do motor	48
4.1.3 Atividade 3: Discussão das respostas do questionário de múltipla escolha	50
4.2 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	51
4.2.1 Primeiro questionário.....	53
4.2.2 Desenvolvimento do tema proposto	54
4.2.3 Análise das respostas do primeiro questionário	57
4.2.4 Utilização do motor de 4 tempos	61
4.2.5 Análise do segundo questionário	64
4.2.6 Revisão dos conceitos apresentados no segundo questionário.....	68
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL.....	77

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A contribuição da ciência e da tecnologia neste momento de crise, desencadeada pela pandemia do novo coronavírus (COVID-19), é fundamental não só para o enfrentamento da doença, mas também para apoiar os esforços de produção voltados para a recuperação econômica após a pandemia.

Além de moldar a pesquisa científica nos anos de 2020 e 2021, na busca por vacinas e tratamentos que minimizem os efeitos da doença, a pandemia do COVID-19 forçou o fechamento de escolas, universidades e o distanciamento entre os países, fazendo com que aulas, reuniões e relações internacionais fossem estabelecidas remotamente, demandando recursos tecnológicos imediatos.

A forte aliança entre ciência e tecnologia demonstrada nestes últimos dois anos nos deixou a lição de que é necessário, sempre que possível, promover a cultura científica não só nas salas de aulas, mas diante da sociedade como um todo. Com o avanço da pandemia foi possível perceber também as limitações de nossos métodos científicos, mostrando que os mesmos não são onipotentes, pois muito ainda precisa ser otimizado e descoberto. Como exemplo, ainda não se tem informações suficientes para determinar com precisão a eficácia das vacinas com relação ao tempo de imunização ou sobre a origem, a evolução e os hospedeiros intermediários do vírus (ZHU; MENG; MENG, 2020; ZHANG, 2021; ZIMMER, 2022). Contudo, esse cenário também é útil para nos ensinar que a ciência é um empreendimento contínuo, que deve ser sempre incentivado financeiramente e culturalmente, e não algo pronto que resolverá todos os problemas da humanidade de maneira imediata. Portanto, é necessário acreditar na ciência, familiarizar alunos e a sociedade com a metodologia científica e fazer com que as pessoas tenham alta consideração pela ciência. A ciência nos fornece força e confiança para o enfrentamento de uma pandemia, por exemplo, pois esta não impõe limites para a humanidade explorar a natureza.

Nesta dissertação exploramos esta aliança entre ciência e tecnologia para ensinar conceitos básicos de Termodinâmica para estudantes do ensino médio. A escolha do tema

Termodinâmica para o desenvolvimento do nosso trabalho é devido à importância desta ciência no estabelecimento de uma conexão muito próxima entre físicos, inventores e tecnólogos. O surgimento da Termodinâmica pavimentou o caminho para um novo mundo de tecnologia nos séculos XIX e XX, com a melhoria da eficiência da máquina a vapor e sua evolução através dos motores de combustão interna (HEWOOD, 1988; PULKRABEK, 1997; HASSANI, 2010). A descoberta de novos combustíveis e o desenvolvimento dos motores fizeram com que a sociedade prosperasse significativamente para se libertar do trabalho manual pesado para a produção de alimentos, por exemplo, tornando possível várias formas de transporte eficientes e de longa distância, como o avião, e ainda ajudou a revolucionar os processos de geração de energia.

A alfabetização científica dos estudantes ou das pessoas, em geral, é outro elemento fundamental para o avanço da ciência e da tecnologia (HASSANI, 2010). No tema escolhido isso pôde ser explorado significativamente em sala de aula, pois é muito comum as pessoas utilizar os conceitos de calor, temperatura e energia, por exemplo, de maneira inadequada, do ponto de vista científico, fazendo com que concepções alternativas sejam criadas dificultando ainda mais o ensino das ciências (VIENNOT, 1979; CLEMENT, 1982).

O dispositivo tecnológico utilizado consiste, especificamente, de um motor de combustão interna de quatro tempos sucateado, mas devidamente limpo e preparado para ensinar e discutir os conceitos de calor, trabalho, temperatura, energia, máquinas térmicas, Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, mecanismos de transmissão de energia, entre outros, para a demonstração do funcionamento do motor.

Nossa proposta foi aplicada para estudantes do ensino médio de uma escola pública localizada na cidade de Itu, interior de São Paulo. Esta foi dividida em três atividades, sendo a primeira voltada para sabermos o conhecimento prévio dos alunos sobre o tema escolhido, através de um questionário discursivo, a segunda para apresentação dos conceitos abordados utilizando o motor de quatro tempos e a terceira voltada para a verificação do estímulo fornecido aos alunos através de um questionário de múltipla escolha. A proposta foi aplicada em quatro aulas de 45 minutos sendo muito bem recebida pelos alunos e é viável para ser aplicada tanto em laboratório quanto em uma sala de aula convencional.

Nosso produto educacional consiste de um tutorial para mostrar como o motor utilizado pode ser adequadamente preparado e transformado em material didático para complementar as aulas de Física e uma sequência didática sugestiva para trabalhar os conceitos físicos propostos para demonstrar o funcionamento do motor de quatro tempos em um contexto de aplicação da ciência para o desenvolvimento de tecnologia.

Nossa principal motivação em utilizar um motor real para a discussão de tópicos de Física foi mostrar para os alunos como os conceitos que eles aprendem em sala de aula, muitas das vezes de maneira completamente abstrata, podem ser aplicados para o desenvolvimento de tecnologias que estão presentes no nosso cotidiano. Adicionalmente, discutimos como a tecnologia pode contribuir significativamente para o desenvolvimento e criação de novas áreas da ciência, como aconteceu com a Termodinâmica.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo fazemos uma discussão sobre a relação entre ciência e tecnologia e como o uso de tecnologias pode auxiliar no ensino de Física. Adicionalmente, discutimos o que já tem sido feito neste sentido para o ensino de Termodinâmica, com o intuito de justificar e mostrar a importância do nosso trabalho.

2.1 A CIÊNCIA E A TECNOLOGIA

Podemos dizer, sem perda de generalidade, que a ciência e a tecnologia são empreendimentos interdependentes.

Com o rápido desenvolvimento da Termodinâmica e do Eletromagnetismo no século XIX, foi possível desenvolver uma variedade de dispositivos tecnológicos novos e engenhosos que permearam a sociedade até metade do século XX. Com o advento da Mecânica Quântica, um novo mundo tecnológico surge na segunda metade do século XX. O surgimento de uma grande variedade de dispositivos tecnológicos multifuncionais faz com que cientistas, inventores e tecnólogos estabeleçam uma conexão muito próxima. Esta relação íntima entre diferentes áreas científicas e técnicas surge como uma fonte de confusão entre os alunos, e na sociedade como um todo, sobre o que é ciência e o que é tecnologia e quais os seus propósitos (HASSANI, 2010; ZUBAIRY, 2020).

A ciência é voltada para o estudo de questões gerais e fundamentais, que visam buscar tanto o entendimento do comportamento humano, da ética, moralidade, motivações, etc., quanto a investigação do universo além dos limites da nossa mentalidade. A primeira é conhecida como *ciências humanas* e a segunda como *ciências naturais* (INGTHORSSON, 2013). Cada área da

ciência tem uma metodologia de trabalho. Esta pode ser utilizada para qualificar e até mesmo definir a área da ciência em questão.

A Física, por exemplo, que é o foco deste trabalho, é uma ciência natural baseada na observação, na experimentação e nas análises matemáticas, cujo propósito é encontrar leis físicas quantitativas capazes de descrever fenômenos e o comportamento de sistemas pertencentes ao microcosmo e ao macrocosmo. Ou seja, essa área da ciência é desenvolvida principalmente pelos métodos da observação, da experimentação e da matemática. Para ensinar Física é imprescindível que o professor explore estes métodos em sala de aula para mostrar como um físico trabalha. Mas o que um físico, ou um cientista em geral, faz? O que significa dizer que um cientista se ocupa da investigação do universo além dos limites da nossa mentalidade?

Isso significa tentar descobrir os mistérios da natureza sem se preocupar, a princípio, com o seu uso potencial para a humanidade. Independentemente da diversidade de opiniões e costumes existentes na humanidade, a ciência é desprovida de qualquer traço cultural (HASSANI, 2010).

Já a tecnologia, por outro lado, é a aplicação da ciência, carregando consigo todo um contexto cultural, político e econômico. Ou seja, todo o conforto que dispomos através da eletricidade que chega nas nossas residências, meios de transporte cada vez mais rápidos e eficientes e até mesmo a medicina, por exemplo, são provenientes da aplicação das leis da natureza por inventores e tecnólogos.

Apesar da ciência e da tecnologia não serem a mesma coisa, a tecnologia pode impulsionar pesquisas científicas de maneira significativa. Como exemplos, podemos citar a medicina, que é a aplicação da ciência para o tratamento de doenças, e a máquina a vapor, que culminou na necessidade da criação de uma nova área da ciência, dada pela Termodinâmica, para o melhor entendimento e desenvolvimento dos motores.

Esta forte interação entre pesquisa científica e aplicação tecnológica deu origem ao termo *tecnociência* ou *ciência técnica* para designar, de certa forma, a ciência contemporânea. Muitos físicos atuais, por exemplo, desenvolvem pesquisas científicas de base já com um objetivo de aplicação pré-estabelecido, como no caso das tecnologias quânticas (LACEY, 2012; LUZ, 2014; ZUBAIRY, 2020).

2.2 O USO DE TECNOLOGIAS PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS

Com relação ao ensino de ciências, o uso de tecnologias pode auxiliar os alunos no entendimento de conceitos científicos abstratos, por vezes, difíceis de serem compreendidos sem o uso de um dispositivo ou, equivalentemente, a realização de um experimento. A experimentação carrega uma infinidade de dispositivos tecnológicos necessários para a realização de caracterizações e medidas, sem as quais não é possível obter qualquer avanço científico. A matemática é outro método científico que necessita da tecnologia, através das simulações computacionais, por exemplo, para poder avançar, assim como a metodologia da observação, que foi consideravelmente melhorada com a inserção de tecnologias através dos telescópios e microscópios. Ou seja, o avanço da tecnologia desencadeia o avanço das metodologias científicas e, conseqüentemente, o avanço da própria ciência (ELLERMEIJER; TRAN, 2019).

A tecnologia pode desempenhar um papel muito importante na atividade científica em sala de aula ou no laboratório através do fornecimento de ferramentas científicas e recursos devidamente adaptados para aprendizes e professores, como softwares, kits experimentais, dispositivos e sensores, material de apoio, disponibilidade de computadores e internet em sala de aula e até mesmo os próprios celulares dos alunos (ZOLLMAN; FULLER, 1994; HOFSTEIN; LUNETTA, 2003; FIOLEAIS; TRINDADE, 2003, PINHEIRO; SILVEIRA; BAZZO, 2007; HECK; KEDZIERSKA; ELLERMEIJER, 2009).

Já foi demonstrado que a tecnologia pode ajudar a tornar o ensino de Física mais relevante e autêntico, conectando os alunos à vida real, e até mesmo fornecer oportunidades aos mesmos para conduzir suas próprias investigações (ELLERMEIJER; TRAN, 2019).

2.2.1 Ensinando Termodinâmica com o auxílio de Tecnologias

Historicamente, a Termodinâmica surgiu a partir da necessidade de aumentar a eficiência de máquinas térmicas, ou seja, esta é uma área da Física motivada e impulsionada pela tecnologia. O primeiro trabalho em Termodinâmica neste sentido foi realizado em 1824 pelo físico e engenheiro francês Nicolas Sadi Carnot, que contribuiu significativamente para a formulação da Segunda Lei da Termodinâmica (CARNOT, 1897; HASSANI, 2010).

Nossa proposta neste trabalho vai de encontro com o estudo de Carnot, pois os alunos poderão estudar vários conceitos da Termodinâmica e suas leis a partir da visualização do funcionamento de uma máquina térmica, dada por um motor de combustão interna.

Usualmente a tecnologia utilizada para o ensino da Termodinâmica é observada através de pequenos dispositivos e experimentos como a eolípila de Heron e o pássaro sedento (NOGUEIRA, 2020), o motor Stirling, calorímetros, aparatos para a demonstração de mecanismos de condução de energia, experimentos termoacústicos (AZEVEDO, 2000; TASNÁDI, 2020, YEADON; QUINN, 2021) e até análogos mecânicos para a discussão de conceitos como trabalho, calor e energia (SILVA, 2020).

A utilização de máquinas térmicas para a demonstração de conceitos da Termodinâmica como transformações de energia, sua eficiência, ciclos termodinâmicos e conceitos como trabalho e calor é comumente explorada em sala de aula através de dispositivos mais simples, apresentados em menor escala, como o motor Stirling (YEADON; QUINN, 2021), e o pássaro sedento (NOGUEIRA, 2020). A discussão sobre o funcionamento de motores reais para mostrar os ciclos Otto e Diesel, por exemplo, dentre outros conceitos, são usualmente conduzidas teoricamente através de animações e simulações (CURTO-RISSO; MEDINA; HERNÁNDEZ, 2008; DIAS, 2009; KNIES, 2010, HAGLUND; STRÖMDAHL, 2012; LANNES NETO, 2017; BERTOLDI; EBLING; AMARAL, 2018; FERREIRA, 2020).

Motores ou parte de motores reais, como o que utilizamos neste trabalho, são utilizados principalmente para a discussão do funcionamento de motores de maneira técnica, com relação à montagem, problemas durante o mal funcionamento, lubrificação, sistemas de refrigeração e alguns conceitos de Termodinâmica em cursos técnicos ou de engenharia mecânica (OLIVEIRA, 2003; NEUENSCHWANDER, 2014).

Nossa estratégia com a utilização de um motor de quatro tempos real foi criar um cenário para fazer com que os estudantes estabelecessem uma melhor relação entre os conteúdos de Física abordados com os seus conhecimentos prévios, considerando conceitos fundamentais como calor, trabalho, temperatura e energia. Nesse sentido, tentamos conferir maior significado para os alunos sobre os conceitos de Física transmitidos a eles em sala de aula e a importância dos mesmos para o desenvolvimento e otimização de tecnologia.

A existência de conhecimentos prévios apenas, não garante que o ensino de conceitos científicos seja facilitado ou garantido, uma vez que estes podem não ser adequados ou serem utilizados no cotidiano dos aprendizes de maneira cientificamente incorreta. Um exemplo típico, diretamente relacionado ao tema do nosso trabalho, é o uso rotineiro da terminologia calor. Esta é incorretamente utilizada para descrever sensações térmicas, o aumento de

temperatura nos corpos ou até como uma substância que é transmitida de um corpo para outro devido à uma diferença de temperatura entre os mesmos. É usual ouvirmos as pessoas dizerem que “*hoje está calor*” ou “*a temperatura de um corpo diminuiu porque ele perdeu calor*” ou ainda que “*o calor de um corpo foi transmitido para outro*”. Este tipo de conhecimento preexistente dificulta o estabelecimento e aprendizagem de novos conceitos, relacionados ao calor neste exemplo, ou o uso correto ou mais adequado de terminologias e definições do ponto de vista científico.

Dessa forma, esperamos que o nosso produto educacional possa mitigar tais concepções e atender tanto os alunos que já tenham algum conhecimento sobre motores, para explorar os conceitos abordados de maneira mais significativa, quanto aqueles que nunca discutiram o assunto para o estabelecimento de novos conhecimentos.

Capítulo 3

PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nosso produto educacional foi elaborado para demonstrar aos estudantes como a Física e o desenvolvimento de tecnologias podem ser ricamente explorados nos motores a combustão interna. Este tipo de máquina térmica atualmente equipa quase todos os veículos automotivos no mercado. Neste capítulo descrevemos como o motor de combustão interna utilizado neste trabalho foi preparado e adaptado para ser usado em sala de aula como material didático e também como os conceitos de Física sugeridos podem ser abordados com o auxílio do mesmo.

3.1 PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Para a demonstração dos processos e conceitos básicos da Termodinâmica adquirimos um motor de quatro tempos, com um único cilindro (monocilíndro) e refrigerado a ar, que equipava um trator cortador de grama, como o apresentado na figura 3.1. O motor utilizado estava danificado, não podendo mais ser reparado para voltar ao mercado. Isso mostra que o professor do ensino básico pode utilizar sucata como material de ensino. Optamos por este modelo por ser compacto e de fácil manuseio.

Para que o motor pudesse ser utilizado didaticamente em sala de aula foram necessárias algumas adequações. Para isso o motor foi desmontado, como mostrado na figura 3.2.

Figura 3.1 – Foto ilustrativa do trator cortador de grama equipado com o mesmo modelo de motor que utilizamos para a elaboração do nosso produto educacional.



Fonte: Trator Cortador De Grama Troy Bilt 13.5hp. Foto extraída de: <https://www.submarino.com.br/produto/1256800010>. Acesso em: 15 out. 2021.

Figura 3.2 – Foto do motor desmontado para a realização da limpeza, seleção das peças e adequação para ser utilizado em sala de aula como material didático.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para evitar descartes inadequados, as peças não utilizadas foram doadas para uma empresa de reciclagem da região de Itu, São Paulo. A carcaça do motor e as peças selecionadas para a elaboração do nosso produto foram adequadamente limpas. Na figura 3.3 apresentamos a carcaça do motor limpa.

Após a limpeza, fizemos um corte na parte superior do cilindro, conforme apresentado na figura 3.4, para mostrar a câmara de combustão e facilitar a visualização do movimento do pistão durante a execução dos quatro tempos do motor.

Figura 3.3 – Foto da carcaça do motor desmontado após a limpeza.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.4 – Foto mostrando uma parte do motor antes e depois do corte transversal feito na região superior do cilindro para facilitar a visualização do movimento do pistão do motor.



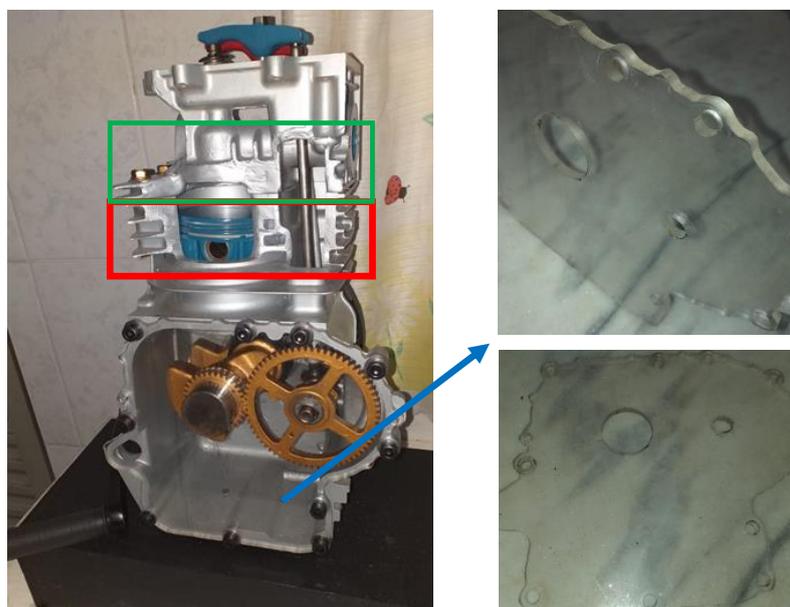
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a limpeza e remoção de cavacos, a carcaça do motor foi pintada, primeiramente com um fundo primer, para melhorar a aderência da tinta, e em seguida com tinta automotiva na cor alumínio, para não descaracterizar a aparência metálica da carcaça do motor.

A tampa de alumínio que faz o fechamento da parte inferior do motor foi substituída por uma tampa transparente de acrílico, como a mostrada na figura 3.5. Este procedimento foi realizado para permitir que os alunos observassem a transformação do movimento linear do pistão no movimento circular do virabrequim, a partir da conversão de energia térmica em

mecânica. Através desta tampa pode-se apresentar também o movimento do comando de válvulas, responsável pela abertura e fechamento das válvulas de maneira sincronizada para que o motor funcione de forma precisa. Na figura 3.5 mostramos que o corte feito na parte superior do cilindro (figura 3.4), destacado pelo quadro vermelho, foi estendido para a região do cabeçote, logo acima do cilindro, para que os alunos possam enxergar o movimento de abertura das válvulas durante o processo de admissão da mistura ar-combustível na câmara de combustão e da exaustão dos gases provenientes da combustão.

Figura 3.5 – Foto da tampa de acrílico, à direita, confeccionada para tornar o interior da câmara de óleo do motor visível, conforme mostrado na foto à esquerda. Nesta parte encontram-se a maior parte dos componentes móveis do motor. O quadro vermelho mostra o corte feito na parte superior do cilindro, como mostrado na figura 3.4. Este corte é estendido à região do cabeçote, quadro verde, para facilitar a visualização da abertura das válvulas de admissão e exaustão do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Optamos por pintar alguns dos componentes internos do motor (figura 3.6) com cores diferentes para facilitar a identificação, a diferenciação e a visualização dos mesmos durante seus movimentos. Dentre eles estão o *virabrequim*, também chamado de árvore de manivelas, responsável pela conversão do movimento de sobe e desce do pistão em movimento de rotação; o *comando de válvulas*, utilizado para acionar as válvulas de admissão e escape através das varetas que são conectadas aos *balancins* e o *pistão*, ou êmbolo, que recebe a expansão dos gases provenientes da explosão da mistura ar-combustível. O movimento do pistão é transmitido ao virabrequim pela *biela*, que é presa ao pistão através do *pino*.

Figura 3.6 – Foto das peças do motor pintadas em cores diferentes para facilitar a identificação e a visualização das mesmas durante o funcionamento do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos estes componentes são colocados em movimento durante o funcionamento do motor. Os balancins foram pintados especialmente nas cores azul e vermelho para fornecer uma representação visual das temperaturas menores e maiores, respectivamente, observadas no ciclo de trabalho do motor. Isso será discutido com maiores detalhes mais adiante.

Após o preparo dos componentes, o processo de montagem do motor pode ser iniciado. Uma observação muito importante que deve ser feita é que, não basta apenas colocar cada componente em seu devido lugar, é necessário fazer a sincronização do sistema observando o ponto que vem gravado de fábrica tanto na engrenagem do comando de válvulas, quanto na engrenagem do virabrequim, como mostrado na figura 3.7. Dessa forma é possível movimentar os componentes do motor da mesma maneira que é observado no funcionamento real do mesmo.

Para dar sustentação ao motor e facilitar o manuseio do dispositivo durante o seu funcionamento foi confeccionada uma base de madeira. Para realizar o giro do motor e demonstrar os processos termodinâmicos durante o seu funcionamento, adaptamos uma manivela no eixo do virabrequim, construída por nós mesmos a partir de materiais recicláveis, conforme foto apresentada na figura 3.8 à esquerda.

Figura 3.7 – Fotos mostrando as marcações de fábrica das peças do motor para facilitar a sincronização do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.8 – À esquerda apresentamos uma imagem da manivela construída a partir de materiais reciclados e utilizada para facilitar a movimentação do motor durante as aulas. À direita é apresentado o parafuso utilizado para a fixação da manivela composto por uma chave de catraca quebrada (seta) soldada a um parafuso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A alavanca da manivela foi feita com um pedivela de bicicleta e a empunhadura com uma manopla, também de bicicleta. Esta foi fixada à alavanca por um parafuso.

Para fazer o acoplamento da manivela no eixo do virabrequim utilizamos uma chave de catraca quebrada e a soldamos na cabeça de um parafuso de fixação, como mostrado na figura 3.8 à direita. Este parafuso fixa o volante contra peso situado na parte de trás do motor, como apresentado na figura 3.9. O volante contra peso é o que auxilia o motor no momento do giro, garantindo a inércia do movimento do pistão. Durante a demonstração em sala de aula foi feita uma comparação do giro do motor com e sem o volante para que os alunos entendessem a diferença. Na figura 3.10 apresentamos diferentes ângulos do motor completamente montado, pronto para ser utilizado em uma sala de aula convencional ou em laboratórios apropriados para demonstrações experimentais.

Figura 3.9 – Volante contra peso acoplado na parte de trás do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.10 – Fotos em diferentes ângulos do motor pronto para ser utilizado como material didático.

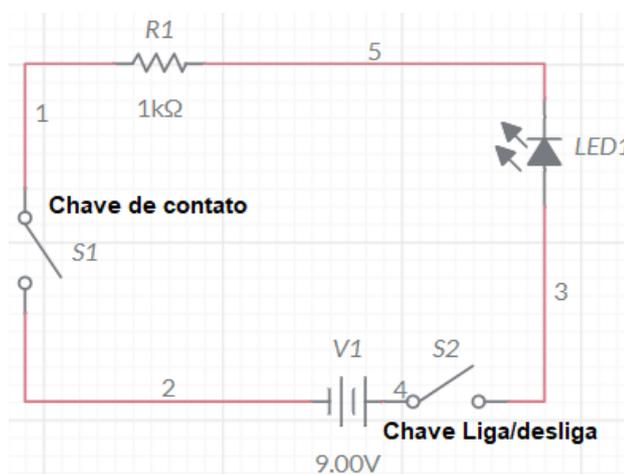


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para simular a ignição da mistura ar-combustível com a vela na câmara de combustão nós adaptamos uma lâmpada de LED na carcaça de uma vela de ignição. A lâmpada é acionada através de um circuito elétrico simples com um sensor de fim de curso do tipo toque, como mostrado na figura 3.11. A lâmpada é acionada quando o pistão sobe no cilindro, que é o momento em que a mistura ar-combustível é comprimida para a realização da combustão.

O motor que acabamos de apresentar é o principal componente do nosso produto educacional. Adicionalmente a esta montagem, preparamos uma sequência didática para mostrar como conceitos básicos de Termodinâmica, como temperatura, calor, trabalho, energia, entre outros, podem ser abordados a partir da utilização do motor de combustão interna. Estes conceitos são descritos na próxima seção e o produto educacional é apresentado integralmente no Apêndice desta dissertação de mestrado em uma linguagem acessível para o professor do ensino médio.

Figura 3.11 – Fotos mostrando uma lâmpada de LED adaptada na carcaça de uma vela de ignição (superior esquerda) e o correspondente circuito elétrico acoplado ao motor (superior direita) utilizado para acionar a mesma e simular a ignição da mistura ar-combustível na câmara de combustão no momento em que o pistão comprime a mistura no cilindro. Abaixo mostramos a malha do circuito elétrico e os valores dos componentes utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção abordamos de maneira sugestiva os conceitos básicos de Termodinâmica que podem ser tratados e discutidos com a utilização do motor de combustão interna. Apresentamos também um breve histórico deste motor, o impacto que os mesmos trouxeram para a sociedade, sua funcionalidade e um pouco sobre os seus componentes, tendo como base de explicação o motor utilizado.

3.2.1 Breve histórico sobre o motor de combustão interna

Um motor de combustão interna é uma máquina térmica que converte a energia química de um combustível, como álcool, gasolina, diesel, entre outros, em energia mecânica. Nestes motores a energia química é primeiramente convertida em energia térmica através da combustão da mistura ar-combustível no interior do sistema mecânico do motor. Em um motor de combustão externa, como um motor Stirling ou uma máquina a vapor, esse processo ocorre fora do motor. As substâncias ou fluidos de trabalho em um motor de combustão interna, responsáveis pela movimentação das partes mecânicas do motor, são a mistura ar-combustível, antes da combustão, e os gases provenientes da combustão. A conversão da energia térmica em energia mecânica é feita usualmente através de um eixo de rotação (HEWOOD, 1988).

Estes motores são usualmente utilizados em veículos de transportes como carros, caminhões, motocicletas e alguns aviões, na realização de serviços pesados como em tratores para trabalhos agrícolas e para a construção civil, em máquinas de pavimentação asfáltica, como motores estacionários para acionar geradores e bombas e motores menores portáteis para a realização de trabalhos mais leves como sopradores de ar, motosserras, cortadores de grama, etc.

A maioria dos motores de combustão interna são motores recíprocos, ou mais usualmente conhecidos como motores de pistão. Estes são caracterizados por pistões que se movem para frente e para trás ou para cima e para baixo em cilindros no interior do motor. Motores recíprocos podem ter um cilindro ou vários, até 20 ou mais, e estes podem ser dispostos em diferentes configurações geométricas. Além disso, estes motores podem ser manufacturados de diferentes formas com relação ao seu tamanho, geometria, estilo e características operacionais (PULKRABEK, 1997).

O motor de combustão interna tornou-se uma realidade prática na segunda metade do século XIX, com a invenção de Jean J. E. Lenoir (1822-1900) em 1860, coincidindo com o desenvolvimento do automóvel. Nicolaus A. Otto (1832-1891) e Eugen Langen (1833-1895) foram dois dos principais inventores da época, introduzindo o motor Otto-Langen, com maior eficiência, em 1867. Neste período, motores operando com o mesmo ciclo de quatro tempos dos motores dos automóveis modernos começaram a evoluir como o melhor modelo. Otto recebeu grande credibilidade quando seu protótipo de motor de quatro tempos foi construído em 1876, por ter reduzido significativamente o peso e o volume do motor (HEWOOD, 1988; PULKRABEK, 1997).

Em 1880 o motor de combustão interna foi utilizado pela primeira vez em automóveis. Na mesma década os motores de dois tempos tornaram-se práticos e foram manufaturados em larga escala. Em 1892, Rudolf Diesel (1858-1913) aperfeiçoou seu motor de ignição por compressão para o mesmo modelo de motor diesel que conhecemos hoje. Antes disso, estes motores eram grandes, lentos, ruidosos e possuíam apenas um cilindro, apesar de serem geralmente mais eficientes que os motores de ignição por centelha. Demorou até a década de 1920 para que motores de ignição por compressão multicilindros fossem construídos em um tamanho menor o suficiente para serem utilizados em automóveis e caminhões (HEWOOD, 1988; PULKRABEK, 1997).

Além da grande quantidade de experimentos e desenvolvimento na Europa e Estados Unidos na segunda metade do século XIX, dois outros empreendimentos tecnológicos ocorreram naquela época para estimular o surgimento do motor de combustão interna. Em 1859 o petróleo bruto foi descoberto na Pensilvânia, fazendo com que combustíveis melhores fossem desenvolvidos para serem utilizados nestes motores. Até então, a falta de bons combustíveis era uma grande desvantagem para o desenvolvimento dos motores. Os combustíveis da época como óleo de baleia, óleos minerais, carvão, pólvora, entre outros, não eram bons o suficiente para os motores em desenvolvimento. Demorou muitos anos até a indústria do petróleo evoluir do petróleo bruto para óleos lubrificantes e a gasolina, que é um dos principais combustíveis utilizados nos automóveis modernos (PULKRABEK, 1997).

O segundo empreendimento tecnológico que estimulou o desenvolvimento do motor de combustão interna foi a invenção do pneu de borracha, ou pneumático, por John B. Dunlop (1840-1921), que foi quem introduziu o mesmo no mercado pela primeira vez em 1888. Esta invenção tornou o automóvel muito mais rápido e desejável, gerando um grande mercado para sistemas de propulsão, incluindo o motor de combustão interna (PULKRABEK, 1997).

Quando o automóvel surgiu, o motor de combustão interna competiu com motores elétricos e a vapor, como meio básico de propulsão. Já no início do século XX os motores elétricos e a vapor desapareceram dos automóveis, devido à baixa eficiência dos motores elétricos e ao longo tempo necessário para ativar ou inicializar o motor a vapor (PULKRABEK, 1997). Dessa forma, o século XX foi o período de prosperidade do motor de combustão interna, tanto para o automóvel quanto para outras aplicações. Contudo, com o desenvolvimento de tecnologia ao longo do século XX, caracterizado pela descoberta de novos materiais e processos para a fabricação de baterias mais duráveis, por exemplo, e a necessidade de utilização de combustíveis menos poluentes para minimizar os efeitos do aquecimento global e melhorar a qualidade de vida das pessoas e dos demais seres da natureza, mais atenção tem sido dada ao motor elétrico e ao desenvolvimento de novas fontes de energia para a propulsão de automóveis e outras aplicações.

3.2.1.1 Classificação dos motores de combustão interna

Os motores de combustão interna podem ser classificados de diferentes formas de acordo com o tipo de ignição, o ciclo do motor (tempos) ou ciclo de trabalho, a localização das válvulas, o modelo ou design básico, a posição e o número dos cilindros, ao tipo de combustível utilizado, entre outros (HEWOOD, 1988; PULKRABEK, 1997). Nós descrevemos a classificação do motor que utilizamos neste trabalho de acordo com algumas destas características e comentamos brevemente algumas diferenças que existem em outros motores. Nosso objetivo nesta seção é fornecer uma visão geral e familiarizar o leitor com a terminologia específica dos componentes e processos que ocorrem em um motor de combustão interna. Maiores detalhes através de fotos, ilustrações e diagramas são fornecidos mais adiante, durante a exposição dos conceitos físicos envolvidos para melhorar o entendimento de tais processos.

Nosso motor é um motor de combustão interna de *ignição por centelha*. A centelha é produzida por um dispositivo elétrico, chamado de vela de ignição, através de uma descarga elétrica causada por uma alta voltagem imposta entre os dois eletrodos da vela. Como estes eletrodos são localizados no interior da câmara de combustão, a centelha provoca a explosão da mistura ar-combustível empurrando o pistão e gerando movimento no eixo do motor. Existem também os motores de *ignição por compressão*. Nestes a mistura ar-combustível explode devido ao aumento de temperatura provocado pela alta compressão dos mesmos na câmara de combustão. Este processo é utilizado usualmente nos motores a diesel, comuns em ônibus, caminhões, caminhonetes, tratores, trens e navios no Brasil e também em vários carros populares na Europa.

O motor que utilizamos é um motor cujo ciclo de trabalho é de *quatro tempos*. Um ciclo de quatro tempos é caracterizado por quatro movimentos do pistão durante duas rotações do eixo do motor (virabrequim). Em cada movimento ou tempo do pistão tem-se um processo termodinâmico específico. Estes serão discutidos em maiores detalhes mais adiante, quando os conceitos de Física forem abordados. Outra característica importante no ciclo de trabalho do motor que utilizamos é que ele é naturalmente aspirado. Isso significa que a mistura ar-combustível é aspirada, sugada, para dentro da câmara de combustão pelo movimento descendente do pistão, que cria uma diferença de pressão entre a câmara e a atmosfera na vizinhança do motor. Em alguns motores a mistura é injetada através de um compressor ou uma turbina. Outro tipo de motor é o de ciclo de *dois tempos*, caracterizado por dois movimentos do pistão durante uma rotação do virabrequim. Estes motores, por serem mais leves e compactos, eram usualmente utilizados em motos e mobiletes, sendo ainda muito versáteis em diversas aplicações como em karts, cortadores de grama, sopradores de ar, motosserras, jet skis, entre outros. Por serem altamente poluentes, devido à necessidade de misturar óleo no combustível, os motores de dois tempos se tornaram inviáveis para aplicações em motos, automóveis e veículos pesados, como no caso do trator cortador de grama equipado com o motor de quatro tempos que utilizamos.

As *válvulas de admissão e escape* do motor que utilizamos estão localizadas na *cabeça do motor*, comumente chamada de *cabeçote*. A cabeça do motor é a parte superior da câmara de combustão. Além das válvulas, a vela de ignição também está localizada no cabeçote. Em alguns motores as válvulas estão localizadas no *bloco* do motor, que é o componente central do mesmo. Na região do cabeçote e do cilindro pode-se observar também várias aletas metálicas na forma de cunha. Estas aletas compõem o sistema de refrigeração do nosso motor para manter a temperatura ideal de funcionamento do mesmo através da circulação do ar em torno de sua carcaça. Isso faz com que nosso motor seja refrigerado a ar.

O design básico do nosso motor é do tipo *recíproco*, também conhecido como motor de *pistão*. Este é caracterizado pelo movimento de sobe e desce do pistão no cilindro e a câmara de combustão é localizada na parte fechada do cilindro. O motor utilizado também é caracterizado por ser um motor de um *único cilindro* e um *único pistão* conectado ao virabrequim. A posição e o número de cilindros pode variar nos motores de combustão interna, sendo classificados de acordo com a configuração dos mesmos, como o *motor em linha*, em que os cilindros são posicionados em linha reta um atrás do outro, o *motor V* com duas fileiras de cilindros conectadas a um único virabrequim formando um ângulo entre si que pode variar de 15 a 120°, entre outros (PULKRABEK, 1997). Os motores em linha com quatro cilindros

são muito comuns em automóveis e outras aplicações. A nomenclatura de um motor do tipo V vem acompanhado de um número para indicar o número de cilindros que o mesmo possui. Um dos mais utilizados no Brasil é o motor V6, caracterizado por duas fileiras com três cilindros cada e equipa veículos maiores como picapes, vans e veículos utilitários esportivos (SUV – *Sport Utility Vehicle*).

Por fim, o *ciclo de trabalho* do nosso motor pode ser aproximado pelo ciclo de Otto, e utiliza gasolina como combustível. Os combustíveis utilizados neste tipo de motor possui baixa volatilidade, como a gasolina e o álcool. Os motores em que é utilizado óleo diesel como combustível funcionam com *ciclo de trabalho de Diesel*.

Na figura 3.12 apresentamos uma foto do motor utilizado e a descrição de cada parte do mesmo, conforme apresentado nesta seção.

Figura 3.12 – Fotos mostrando as partes do motor de combustão interna utilizado neste trabalho, conforme a terminologia apresentada nesta seção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas próximas seções apresentamos os conceitos básicos de Termodinâmica que podem ser abordados em sala de aula para discutir sobre o funcionamento do motor de quatro tempos utilizado e o ciclo de trabalho de Otto correspondente. Ao final de cada seção apresentamos uma sugestão de abordagem dos tópicos correspondentes com a utilização do motor para facilitar o trabalho do professor.

3.2.2 A Termodinâmica e o Movimento Térmico

A Física se ocupa do estudo de diferentes formas de movimento. Na Termodinâmica são analisados fenômenos causados pela ação combinada de um número muito grande de moléculas ou outras partículas se movendo continuamente de maneira desordenada. Todos os corpos que estão a nossa volta são compostos por pequenas partículas e várias de suas propriedades físicas tem origem neste movimento coletivo desordenado. Ou seja, a ação coletiva das partículas fornece novas qualidades para o sistema que as mesmas compõem. A este movimento é dado o nome de *movimento térmico*. Apesar do nome térmico, isso não significa que estudamos apenas fenômenos térmicos com a Termodinâmica. Estudamos também fenômenos elétricos, magnéticos, quânticos, entre outros. Mas os estudos destes fenômenos são conduzidos a partir do ponto de vista das propriedades específicas do movimento térmico em cada um deles. Os principais conteúdos da Termodinâmica consistem em analisar as leis do movimento térmico em sistemas que estão em equilíbrio e na passagem de sistemas para o estado de equilíbrio (BAZAROV, 1964).

Quando dizemos que um sistema está em equilíbrio termodinâmico, significa que o mesmo está em equilíbrio térmico, químico e mecânico. O equilíbrio térmico é estabelecido quando a temperatura do sistema fica constante. Já o equilíbrio químico é caracterizado quando a estequiometria do sistema é mantida constante ou quando existe uma reação química reversível, de maneira que a quantidade de reagentes e produtos da reação são mantidos em concentrações que não variam com o tempo. O equilíbrio mecânico é observado quando não existem deformações mecânicas no sistema.

Durante o funcionamento de um motor é muito difícil estabelecer o equilíbrio termodinâmico no sistema, pois a temperatura no motor está sempre variando, o que provoca variações nas dilatações térmicas dos componentes do motor. O equilíbrio químico no sistema é comprometido pela queima do combustível, que é uma reação química irreversível. Contudo, podemos considerar em boa aproximação os processos termodinâmicos envolvidos no funcionamento do motor como processos de equilíbrio, pois estes ocorrem em curtos intervalos de tempo. Só para termos uma noção da velocidade destes processos, a velocidade do motor de um carro popular, medida através das rotações do virabrequim por minuto (rpm), pode ultrapassar 5.000 rpm. Isso equivale a mais de 80 rotações por segundo. Como já discutido, para um motor de *quatro tempos*, como o que utilizamos, um ciclo é caracterizado por quatro movimentos do pistão durante duas rotações do virabrequim. Isso significa que um ciclo termodinâmico completo pode durar menos de 0,02 segundo neste caso. Em carros de fórmula

1, a velocidade do motor é próxima de 20.000 rpm, o que equivale a um ciclo termodinâmico completo da ordem de 10^{-3} segundo de duração. O motor que utilizamos pode chegar até 1.300 rpm, o que fornece um ciclo termodinâmico de aproximadamente 0,09 segundo, ou seja, da ordem de 10^{-2} segundo. O tempo para o estabelecimento de um único processo termodinâmico é ainda menor, pois um ciclo termodinâmico possui pelo menos quatro processos. Forneceremos maiores detalhes sobre isso quando discutirmos ciclos termodinâmicos.

Na Termodinâmica, o estudo de propriedades gerais de sistemas físicos em equilíbrio é conduzido a partir de duas leis básicas, chamadas de leis da Termodinâmica, junto com uma variedade de resultados experimentais. Nesta ciência não é considerado explicitamente as noções da estrutura molecular de um sistema. Isso significa que, apesar de todas as propriedades termodinâmicas de sistemas físicos serem provenientes do movimento térmico nos mesmos, a Termodinâmica nos permite estabelecer muitas destas propriedades sem a necessidade de considerar a estrutura molecular dos corpos. Portanto, na análise do funcionamento do motor de quatro tempos, nós não levamos em conta explicitamente a noção de átomos e suas interações para entender todos os conceitos físicos envolvidos.

Sugestão de abordagem: para iniciar as discussões sobre os tópicos propostos o professor pode introduzir a Termodinâmica através de uma descrição histórica, como a importância das máquinas a vapor na Revolução Industrial ou sobre os avanços da termometria, como descrito usualmente nos livros didáticos do ensino básico. Na nossa abordagem preferimos introduzir o movimento térmico e a sua importância para o estudo dos fenômenos termodinâmicos e para a definição de temperatura, como a medida da intensidade deste movimento. Apesar de sua importância, quase nenhuma atenção é dada a esse tipo de movimento nos livros didáticos do ensino básico. O uso do motor para a discussão sobre equilíbrio termodinâmico é imprescindível, pois é necessário fornecer uma ideia do que é um processo de equilíbrio nos processos termodinâmicos envolvidos no funcionamento do motor, uma vez que estes ocorrem em curtos intervalos de tempo. Para isso recomendamos a utilização dos exemplos fornecidos nesta seção ou similares.

3.2.3 Definição de temperatura, calor, trabalho e energia

Quando um carro é ligado é possível notar um aquecimento no capô do mesmo rapidamente, pois abaixo do capô é a região onde encontra-se os motores da maioria dos automóveis. Mas qual é o processo físico responsável por este aquecimento e qual o parâmetro termodinâmico mais adequado para quantificar este aumento de energia?

O aquecimento de qualquer objeto só é possível através de mecanismos de transmissão de energia. A energia é a capacidade da matéria interagir com a matéria para efetuar mudanças físicas (HECHT, 2019) e é classificada de diferentes formas como energia cinética, de repouso, interna, nuclear, entre outras, de acordo com os parâmetros que estão sendo analisados. O aquecimento do motor do carro caracteriza uma mudança física daquele sistema. Estas mudanças são adequadamente monitoradas através da medida da alteração de diferentes parâmetros do sistema, como o seu volume, pressão, temperatura e vários outros.

O parâmetro responsável por monitorar o aquecimento ou o resfriamento de um objeto é a temperatura. Formalmente, a temperatura termodinâmica é um parâmetro interno do sistema, definido no equilíbrio como uma medida da intensidade do movimento térmico do mesmo (BAZAROV, 1964). Ou de maneira mais simples, a temperatura está diretamente relacionada com a agitação das partículas constituintes do sistema. Quanto maior a agitação das mesmas, maior será a temperatura do sistema. A importância da temperatura reside no fato desta propriedade nos permitir determinar se um objeto está em equilíbrio térmico com outros. Sua definição é uma consequência direta de observações experimentais que culminaram no que chamamos hoje de lei zero da Termodinâmica. Esta estabelece que, se dois objetos A e B, isolados termicamente um do outro, estão em contato e em equilíbrio térmico com um terceiro objeto C, então os objetos A e B estão em equilíbrio térmico entre si (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Como já discutido, se dois ou mais objetos estão em equilíbrio térmico, eles possuem a mesma temperatura.

A temperatura medida por um termômetro é chamada de temperatura empírica, pois sua aferição depende da substância termométrica utilizada na construção do termômetro. Esta é representada usualmente pela letra θ e pode ser aferida em diferentes escalas, sendo a escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ou centígrada, a mais conhecida e utilizada no Brasil. Esta escala é definida em relação ao ponto de congelamento 0°C e o de ebulição 100°C da água à pressão de 1 atm.

A escala termodinâmica de temperatura, usualmente conhecida como *escala absoluta*, é representada pela letra T e não depende da substância termométrica. Esta é definida em relação a dois pontos fixos: o *zero absoluto*, que é o limite inferior, inatingível, para a temperatura de qualquer corpo e o *ponto triplo da água*, que é a temperatura em que há a coexistência entre gelo, água e vapor de água em equilíbrio térmico. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a temperatura absoluta é medida em kelvin (K) de maneira que o zero absoluto é dado por $0 K$ e para o ponto triplo da água é definido o valor de $273,16 K$. A conversão da temperatura empírica medida em graus celsius $\theta(^{\circ}\text{C})$ para a temperatura absoluta medida em kelvin $T(K)$ é descrita pela relação $T = \theta + 273,15$. Uma vez que o ponto triplo da água é observado em $\theta = 0,01^{\circ}\text{C}$,

este é aferido na escala absoluta de temperatura por $T = 273,16 \text{ K}$ (BREITHAUPT, 2000; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). A temperatura que utilizamos ao longo deste trabalho para os cálculos e discussão dos conceitos termodinâmicos é a temperatura absoluta, representada pela letra T . Para os valores de temperatura observados no funcionamento de um motor de combustão interna real, utilizamos a temperatura empírica em graus celsius θ .

O tipo de energia associado com a temperatura é a energia interna, comumente chamada de energia térmica. Esta é toda a energia associada com as partículas constituintes do sistema, como átomos e moléculas, incluindo seus movimentos de translação, rotação, vibração e a interação entre estas partículas.

Mas como podemos fazer variar a temperatura de um objeto? Por que observamos o aquecimento do capô do carro, uma vez que o motor deste não está em contato direto com o mesmo?

Como já discutido, para que mudanças físicas sejam observadas em um sistema é necessário que o mesmo ganhe ou perca energia. Para isso é necessário mecanismos de transferência de energia, como o calor e o trabalho. O calor é o método pelo qual energia é transferida de um corpo para outro devido a uma diferença de temperatura entre os mesmos (BAZAROV, 1964; CALLEN, 1985; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Para que energia seja transferida através de calor é necessário estabelecer contato térmico entre os dois sistemas envolvidos. Mesmo que dois objetos não estejam em contato físico entre si, o contato térmico pode ser estabelecido através de outra substância, como o ar, por exemplo.

Por ser um método ou mecanismo de transferência de energia, o calor não compõe uma propriedade do sistema. Este está relacionado ao processo de levar um sistema de um estado para outro apenas e não ao estado de equilíbrio do mesmo. Em muitos livros didáticos encontramos definições incorretas para o calor como sendo “*energia em trânsito*” ou que “*calor é uma forma de energia*”, ou ainda tratando o calor como uma substância que pode ser transferida de um corpo para outro em expressões como “*transferência de calor de um corpo para outro*” ou “*métodos de transmissão de calor*” (SILVA; LABURÚ; NARDI 2008; SILVA, 2020). O que é transferido entre dois sistemas quando existe uma diferença de temperatura entre eles é energia e não calor. O calor é o processo ou método pelo qual energia flui espontaneamente do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura.

O trabalho é outro método de transmissão de energia de um sistema para outro através da ação de uma força em uma determinada distância (HECHT, 2019). Assim como o calor, o trabalho está relacionado a um processo. É possível também aumentar a temperatura de um sistema através de trabalho, bastando passar o dedo em uma superfície, por exemplo. A força

de atrito entre nosso dedo e a superfície, faz com que ambos aumentem sua temperatura. O atrito é o responsável pela necessidade de lubrificação das peças do sistema mecânico de um motor. Caso isso não seja feito, o aumento de temperatura entre as peças pode ser tão grande, que pode ocorrer a fusão das partes, fazendo com que uma peça grude na outra comprometendo seriamente as peças e o funcionamento do motor. Outro exemplo de como aumentar a temperatura de um sistema através de trabalho é a compressão de um gás. Este processo é amplamente explorado no funcionamento de um motor de combustão interna.

Quando um determinado sistema atinge um estado de equilíbrio, não faz mais sentido falarmos em trabalho ou calor e muito menos em medir trabalho ou calor, pois estes não compõem propriedades físicas do sistema.

Sugestão de abordagem: no motor de quatro tempos que utilizamos, estes conceitos estão sempre presentes. O professor pode falar de temperatura, por exemplo, na discussão sobre o aquecimento de toda a carcaça do motor, sobre a diferença de temperatura entre suas partes, no sistema de arrefecimento, entre outros. As variações de temperatura no motor caracterizam a existência de energia fluindo no sistema devido à interação entre suas partes e a ilustração do seu conceito, dado pela capacidade da matéria interagir com a matéria para efetuar mudanças físicas. Tais variações também podem ser exploradas para discutir de maneira introdutória o que é um processo termodinâmico, o estado termodinâmico de um sistema e como o mesmo pode ser levado de um estado de equilíbrio para outro. O calor pode ser discutido nos processos de aquecimento ou resfriamento do sistema e o trabalho no movimento de sobe e desce do pistão, causado pela força aplicada pela explosão da mistura ar-combustível. Energia é transferida do pistão para o virabrequim através de trabalho por intermédio da biela, fazendo com que o mesmo gire e conseqüentemente faça o automóvel entrar em movimento através do sistema de transmissão, composto por um conjunto de engrenagens, polias e eixos, responsáveis por transmitir a energia do motor para as rodas do carro através de trabalho.

3.2.4 A Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica é a generalização do princípio de conservação de energia e foca, usualmente, nos graus de liberdade internos do sistema, descritos pelo conceito de energia interna U , e nos processos de transmissão de energia, dados por calor e trabalho.

Matematicamente, a forma diferencial da Primeira Lei é descrita por:

$$dU = \delta Q - \delta W, \quad (3.1)$$

sendo $\delta Q > 0$ a energia que o sistema adquire através de calor e $\delta W > 0$ a energia que o sistema fornece à vizinhança através de trabalho.

Dessa forma, a equação (3.1) descreve sistemas em que mudanças na energia interna são provocadas pela transferência de energia através de calor ou de trabalho. De maneira mais simplificada, podemos dizer que a Primeira Lei estabelece que um sistema pode ser aquecido ou resfriado (variação de U) pela transferência de energia do sistema para a vizinhança ou da vizinhança para o sistema através de calor ou trabalho.

Uma confusão muito comum entre os estudantes sobre a descrição matemática da Primeira Lei, dada pela equação (3.1), é achar que δQ e δW são medidas de calor e de trabalho, respectivamente. Apesar dos parâmetros Q e W serem nomeados nos livros didáticos de maneira inadequada de quantidade de calor e trabalho, respectivamente, estes não representam tais medidas, mas sim, as quantidades de energia que o sistema adquire ou perde através dos métodos calor e trabalho, respectivamente. É por isso que Q e W são descritos em unidades de energia, o joule (J), pois são quantidades de energia.

Outra observação importante a ser feita na equação (3.1) é que a energia interna é uma diferencial exata e representada pela letra d , enquanto que as energias obtidas ou perdidas através dos métodos calor e trabalho são diferenciais inexatas, representadas pela letra grega δ . Isso significa que a variação da energia interna dU depende apenas dos estados de equilíbrio final e inicial do sistema, enquanto que as quantidades de energia δQ e δW dependem também do processo utilizado para levar o sistema do estado de equilíbrio inicial para o final.

Para facilitar o entendimento do que significa “depende do processo” vamos considerar o aquecimento de uma porção de água do estado inicial a 25 °C para um estado final a 50 °C, por exemplo. Se considerarmos o aquecimento da água através de um resistor, como o de um chuveiro, teremos energia fornecida ao resistor através de trabalho elétrico. Essa energia é dissipada na água por efeito Joule e é transmitida por todo o sistema através de calor até que sua temperatura seja elevada a 50 °C. Um outro processo poderia ser colocar a água em uma panela e aquecê-la através da chama de um fogão, de maneira que energia é transferida das paredes da panela para a água através de calor até a temperatura desejada. Nestes dois processos, que podemos nomear como I e II, teremos necessariamente $\delta Q_I \neq \delta Q_{II}$, pois no primeiro caso a fonte de energia é elétrica e no segundo a fonte de energia é química (gás), ou seja, as condições em que cada processo foi realizado são diferentes. Isso significa que um processo pode ser mais eficaz que o outro para a mesma finalidade, ou seja, elevar a temperatura da água de 25 °C para 50 °C.

O fato da variação da energia interna dU depender apenas dos estados inicial e final do sistema, significa que para quaisquer processos, como I e II, por exemplo, sempre é observado experimentalmente que $\delta Q_I - \delta W_I = \delta Q_{II} - \delta W_{II}$, mesmo que tenhamos $\delta Q_I \neq \delta Q_{II}$ e $\delta W_I \neq \delta W_{II}$. Ou seja, a diferença $Q - W$ independe do processo.

Este resultado tem uma consequência direta em processos cíclicos, que são aqueles em que o estado inicial do sistema coincide com o seu estado final. Estes processos são característicos em motores de combustão interna, como o que utilizamos. Basta analisarmos o movimento do pistão e veremos que o sistema é levado ao mesmo estado inicial após algumas etapas. Isso ficará mais claro quando discutirmos ciclos termodinâmicos. Dessa forma, se o estado inicial do sistema for caracterizado pela energia interna U_1 e o estado final por U_2 , em um processo cíclico teremos $U_1 = U_2$, de maneira que $dU = U_2 - U_1 = 0$. Pela equação (3.1) obtemos $\delta Q = \delta W$. Este resultado mostra que para termos energia transferida do motor para as rodas de um veículo através de trabalho é necessário que energia seja adquirida pelo motor através de calor, ou seja, só é possível fazer um motor térmico funcionar se tivermos uma fonte térmica de energia. Esta é fornecida pela queima do combustível. Sem combustível um carro, por exemplo, não pode ser colocado em movimento. Na Termodinâmica esse resultado nos diz que é impossível conceber um *moto perpétuo de primeira espécie*, ou seja, podemos dizer de maneira geral que é impossível um motor criar energia, ele apenas converte uma modalidade de energia em outra. No caso do motor de combustão interna, temos energia química do combustível sendo convertida em energia térmica e finalmente em energia mecânica.

Para saber mais sobre a Primeira Lei da Termodinâmica e suas consequências veja a referência (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007).

Sugestão de abordagem: para que a discussão sobre a Primeira Lei da Termodinâmica, ou o princípio de conservação de energia, fique bem fundamentada é imprescindível que esta seja feita logo após a definição de calor, trabalho e energia, discutidos na sugestão de abordagem da seção anterior. Tal importância reside no fato deste princípio relacionar matematicamente a modalidade de energia, dada pela energia interna U , com os métodos de transmissão de energia, calor e trabalho. O professor não irá falar sobre diferenciais exatas e inexatas no ensino médio, mas ele pode apresentar a equação de maneira mais simplificada, $\Delta U = Q - W$, a qual pode ser reescrita como $Q = \Delta U + W$. Quando escrita dessa forma, o princípio de conservação torna-se mais visível matematicamente, pois a energia total adquirida pelo motor através de calor Q pela queima do combustível, será convertida em energia mecânica através de trabalho W , traduzida no movimento mecânico do pistão, e na variação da energia

interna ΔU de todo o sistema, identificada pelo aquecimento do mesmo. É interessante também o professor falar sobre a variação da energia interna em um processo cíclico, em que $\Delta U = 0$ e consequentemente $Q = W$, para explicar a necessidade de uma fonte de energia para a conversão de uma modalidade de energia em outra através de trabalho, ou termos usuais, para a realização de trabalho. Isso é importante para discutir sobre a impossibilidade de geração de energia por um motor ou sua autossustentabilidade, de maneira que este dispositivo só pode converter uma modalidade de energia em outra.

3.2.5 Máquinas térmicas e a Segunda Lei da Termodinâmica

Um motor é uma máquina desenvolvida para converter uma ou mais formas de energia, como energia elétrica, térmica, química, nuclear, entre outras, em energia mecânica. Uma máquina térmica é um motor que opera ciclicamente para converter energia térmica em energia mecânica. Um motor de combustão interna, como o que utilizamos, é uma máquina térmica que utiliza a energia térmica, proveniente da queima do combustível, para mover o pistão, de maneira que esta é convertida em energia mecânica através de trabalho, fazendo com que o veículo se movimente.

A Segunda Lei da Termodinâmica foi descoberta durante os estudos conduzidos para otimizar a eficiência de máquinas térmicas. O primeiro trabalho teórico formal relacionado é devido à Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), publicado em 1824 e intitulado “*Reflexões sobre a força eletromotriz do calor*” (CARNOT, 1897). Assim como a Primeira Lei, a Segunda Lei da Termodinâmica é uma generalização de resultados obtidos experimentalmente. Além de estabelecer as condições para a obtenção da eficiência máxima de máquinas térmicas, a Segunda Lei estabelece a existência de um parâmetro de estado chamado de *entropia*. Estes conceitos são discutidos em detalhes nas próximas seções.

3.2.5.1 Ciclo de Carnot e a eficiência de máquinas térmicas

Um objeto ou uma substância usualmente sofre mudanças em sua temperatura quando energia é transferida da vizinhança para o sistema ou do sistema para a sua vizinhança, como no exemplo do aquecimento do capô do carro. Contudo, existem situações em que tal transferência de energia não acarreta em mudanças na temperatura do sistema. Exemplos disso é a fusão do gelo, caracterizada por uma transição de estado físico da água de sólido para líquido, ou um processo termodinâmico isotérmico, que pode ser concebido por uma expansão ou compressão volumétrica, mantendo-se a temperatura do sistema constante.

Em todo sistema termodinâmico, seja este simples ou complexo, três processos são sempre possíveis: *processo isotérmico*, que ocorre à temperatura T constante, *processo adiabático*, em que não há trocas de energia através de calor entre o sistema e a vizinhança $\delta Q = 0$, e o *processo politrópico*, que ocorre quando a capacidade térmica do sistema C é mantida constante (BAZAROV, 1964). A mistura ar-combustível presente na câmara de combustão do motor de quatro tempos é um exemplo de sistema termodinâmico sujeito a processos como estes.

O número e as características de outros processos possíveis dependem da natureza do sistema. Em sistemas mais complexos, um número maior de diferentes processos é possível. Como a mistura ar-combustível é um gás, esta pode ser considerada como um sistema termodinâmico simples do tipo (P, V, T) , sendo P a pressão e V o volume do gás. Neste caso, mais dois processos termodinâmicos podem ser concebidos: o *processo isovolumétrico* ou *isocórico*, que ocorre quando o volume da mistura V é mantido constante e o *processo isobárico*, quando a pressão P da mistura é mantida constante.

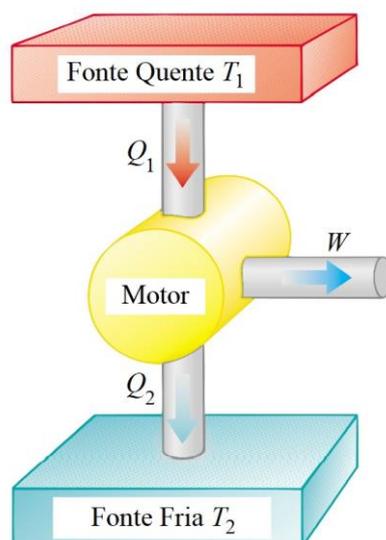
O processo politrópico geralmente não é explorado em livros didáticos do ensino básico, mas este pode ser introduzido através de exemplos conhecidos. Se considerarmos a equação da calorimetria, que relaciona a quantidade de energia Q que um sistema perde ou adquire através de calor com sua variação de temperatura e sua capacidade térmica, $Q = C\Delta T$, tem-se que para $C = 0$ (constante) tem-se $Q = 0$, o que caracteriza um processo adiabático. Isso mostra que um processo adiabático pode ser considerado como um processo politrópico. Quando consideramos o caso particular das capacidades térmicas obtidas a volume e a pressão constantes, C_V e C_P , respectivamente, para um gás monoatômico ideal, estas são independentes da temperatura e são constantes, de maneira que processos isovolumétricos e isobáricos para um gás monoatômico ideal, especificamente, são também processos politrópicos. Estes processos são mais gerais e podem descrever múltiplos processos de compressão e expansão que envolvem transferência de energia através de calor.

Os cinco processos mencionados, isotérmico, adiabático, politrópico, isocórico e isobárico são básicos em Termodinâmica.

Como já discutido, o motor a combustão interna é um dispositivo que opera ciclicamente. Operar em um ciclo de trabalho significa que, após a realização de diferentes processos termodinâmicos na mistura ar-combustível, o sistema volta ao seu estado inicial. Para entendermos melhor o ciclo de trabalho do motor que utilizamos vamos apresentar inicialmente o ciclo de trabalho de uma máquina térmica ideal, descrito pelo *Ciclo de Carnot*. Antes disso, vamos utilizar o diagrama geral de um motor térmico ilustrado na figura 3.13 para mostrar como

a Primeira e a Segunda Leis da Termodinâmica podem ser utilizadas para discutir a importância das fontes térmicas no funcionamento de uma máquina térmica e definir sua eficiência.

Figura 3.13 – Diagrama geral de uma máquina térmica, mostrando a energia Q_1 transferida da fonte quente à temperatura T_1 para o motor através de calor, a energia Q_2 dissipada pelo motor através de calor para a fonte fria à temperatura $T_2 < T_1$ e a energia mecânica W proveniente da conversão da energia térmica através de trabalho.



Fonte: Figura adaptada de Halliday, Resnick e Walker (p. 671, 2007).

Neste diagrama apresentamos dois reservatórios ou fontes térmicas, sendo uma fonte quente à temperatura T_1 e uma fonte fria à temperatura T_2 , de maneira que $T_1 > T_2$. Isso é justificado pelo enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei da Termodinâmica, que estabelece o seguinte: *É impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclo, tenha como único efeito, absorver energia através de calor de um reservatório térmico e converter esta em uma quantidade equivalente de energia através de trabalho* (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007).

Como o processo é cíclico, uma máquina térmica precisa de pelo menos duas fontes térmicas com temperaturas diferentes para que o estado inicial do sistema seja restabelecido e a máquina possa operar de maneira adequada.

No caso do motor de combustão interna, a energia total Q_1 representa a energia adquirida pelo motor através da explosão da mistura ar-combustível. A energia mecânica W responsável por colocar o veículo em movimento não pode ser maior do que Q_1 . Na verdade não é possível nem fazer com que $W = Q_1$, pois existem perdas de energia nos processos de funcionamento do motor. Estas perdas são representadas pelo parâmetro Q_2 .

Pela Primeira Lei da Termodinâmica, equação (3.1), obtemos para um processo cíclico $Q = W$, uma vez que $dU = 0$, sendo $Q = Q_1 - Q_2$, ou seja, o diagrama da máquina térmica apresentado na figura 3.13 nos fornece:

$$Q_1 = W + Q_2. \quad (3.2)$$

Este resultado nos mostra realmente que parte da energia total Q_1 é convertida em energia mecânica W , através de trabalho, e parte Q_2 é dissipada e/ou consumida pela máquina térmica para restabelecer o ciclo de trabalho. Isso significa que é impossível completar um ciclo do motor sem uma compensação, ou seja, não é possível restabelecer o estado inicial do ciclo sem o consumo de combustível para compensar tais perdas. A energia responsável para comprimir a mistura no cilindro ou pelo aquecimento da carcaça do motor ou do capô do carro não pode ser revertida para ser totalmente convertida em energia mecânica com a finalidade de fazer o virabrequim girar apenas. Portanto, se quisermos uma quantidade específica de energia mecânica W de um motor é necessário uma quantidade de energia $Q_1 > W$ para compensar o consumo e as perdas do motor, como mostrado na equação (3.2).

A energia da fonte quente de um motor de combustão interna é obtida da explosão da mistura ar-combustível na câmara de combustão. Mas como podemos identificar a fonte fria deste motor, se é necessário pelo menos duas fontes térmicas para o motor operar ciclicamente?

A fonte fria em um motor de combustão interna é estabelecida através do sistema de refrigeração ou arrefecimento. Este pode ser feito utilizando-se o próprio ar que circula em torno do bloco do motor ou um sistema para a circulação de água nas regiões de maior temperatura do motor.

O motor que utilizamos é um exemplo de motor refrigerado a ar. Toda a sua carcaça e o ar na vizinhança do mesmo funciona como fonte fria. A energia flui espontaneamente através de calor do corpo de maior temperatura, no caso as paredes do cilindro onde ocorre a explosão da mistura, para os corpos de menor temperatura, incluindo a carcaça do motor e seus componentes e o ar. Como já discutido na seção 3.2.1.1, o nosso motor possui aletas de refrigeração na forma de cunhas na região do cabeçote e do cilindro com o objetivo de aumentar a superfície de contato do motor exposta ao ar e garantir um resfriamento efetivo para o funcionamento adequado do motor. Como os blocos dos motores são feitos de metal, como ferro fundido ou ligas de alumínio, esse escoamento de energia é facilitado, pois os metais são bons condutores de energia através de calor ou, equivalentemente, estes são bons condutores térmicos.

Nos motores refrigerados a água o sistema de arrefecimento é composto por peças como bomba d'água, radiador, sensor de temperatura, válvula termostática, ventoinha, reservatório e

aditivo. A bomba d'água faz com que a água, junto com o aditivo, circule pelas galerias do bloco do motor. O aditivo tem a importante função de elevar a temperatura de ebulição da água, para que a mesma não evapore durante o processo de troca de energia com o motor, diminuir sua temperatura de congelamento, para evitar que a água no sistema congele em lugares muito frios quando o veículo estiver parado e ainda prevenir a oxidação do motor. A evaporação da água é ainda mais dificultada porque o sistema opera em um fluxo fechado. Após retirar energia do motor, a água quente é bombeada para o radiador para que a mesma seja resfriada para retornar ao motor. O radiador é composto por vários tubos e lâminas metálicas para facilitar a troca de energia da água com a atmosfera. Caso a temperatura da água seja tão excessiva que a circulação da mesma no radiador não seja suficiente para o seu resfriamento, a ventoinha é acionada para auxiliar no processo. Esta é direcionada diretamente para o radiador.

O controle de temperatura nestes motores é feito por um sensor de temperatura, que indica o valor da temperatura no motor, e a válvula termostática. Quando acionamos o motor de um carro refrigerado a água, a válvula termostática fica fechada para que o motor seja aquecido e atinja a temperatura ideal de funcionamento mais rapidamente. Quando esta é atingida, sua manutenção é estabelecida pela abertura desta válvula para que a água que passa pelo bloco seja bombeada para o radiador. Esse processo é muito importante, pois se a válvula termostática estiver sempre aberta a fonte quente do motor será afetada, de maneira que sua temperatura irá diminuir comprometendo a eficiência do motor térmico. Se a válvula ficar sempre fechada, perde-se a fonte fria do sistema e o motor “ferve” literalmente.

De maneira geral o sistema de arrefecimento é responsável por manter a fonte fria do motor térmico em uma temperatura adequada, pois de outra forma o aumento excessivo de temperatura pode causar danos irreparáveis às peças do motor. É por isso que devemos parar um veículo imediatamente quando há problemas no sistema de arrefecimento do motor.

A eficiência ou o rendimento térmico η de um motor térmico é definido como a razão da energia mecânica W , obtida através de trabalho, pela quantidade total de energia térmica Q_1 fornecida ao sistema pela fonte quente através de calor (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007),

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (3.3)$$

Pela equação (3.2) tem-se que $Q_2 < Q_1$, de maneira que $Q_2/Q_1 < 1$. Conseqüentemente, a eficiência da máquina térmica será sempre $\eta < 1$, ou seja, menor do que 100%, em pleno acordo com o enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei da termodinâmica. Como já discutido, esse resultado já era esperado, pois além das dissipações existe o consumo

de energia no sistema para o restabelecimento do ciclo de trabalho. Se estes não existissem teríamos $Q_2 = 0$, o que pela equação (3.3) forneceria $\eta = 1$, ou seja, uma eficiência de 100%.

Dessa forma, a Segunda Lei estabelece a impossibilidade de conversão completa da energia térmica fornecida ao motor pela fonte quente em uma quantidade equivalente de energia mecânica, ou seja, é impossível construir um motor térmico com eficiência de 100%. Um motor desse tipo é chamado de *moto perpétuo de segunda espécie*. Se este motor pudesse ser concebido ele seria autossuficiente, consumindo a própria energia produzida para manter-se em funcionamento.

Se um motor térmico não pode ter eficiência de 100%, qual é a sua eficiência máxima? A resposta para esta pergunta é fornecida pelo ciclo de trabalho de Carnot.

Como o fluxo espontâneo de energia através de calor é um *processo irreversível*, Carnot percebeu que o máximo rendimento de um motor térmico poderia ser obtido através de *processos reversíveis*. A partir destes processos, o sistema pode retornar às mesmas condições iniciais ao longo da mesma trajetória em um diagrama de pressão em função do volume (PV). Caso isso não possa ser estabelecido o processo é irreversível, devido às perdas de energia. Todos os processos naturais são irreversíveis, portanto, o que Carnot propôs foi uma idealização, impossível de ser concebida experimentalmente, mas de extrema importância para conhecermos o limite superior para o rendimento de todos os motores térmicos reais.

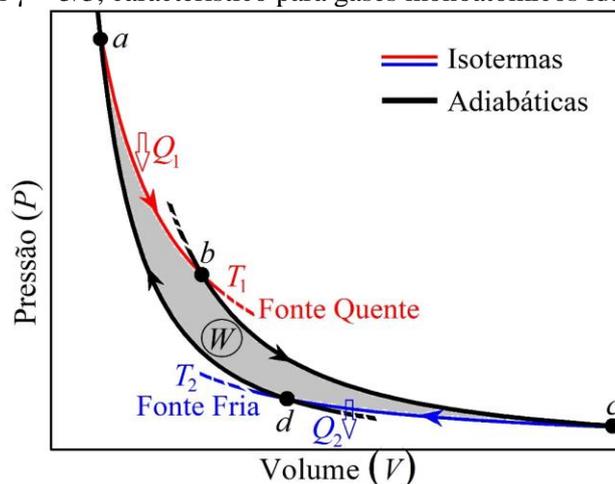
Dois processos reversíveis característicos, em que não há fluxo espontâneo de energia através de calor, são o processo isotérmico (T constante) e o processo adiabático ($\delta Q = 0$). Dessa forma, o ciclo de trabalho de Carnot é um ciclo ideal composto por duas isotermas e duas adiabáticas, como mostrado no diagrama PV apresentado na figura 3.14.

O motor térmico de Carnot opera entre duas fontes térmicas com temperaturas T_1 e T_2 , com $T_1 > T_2$. Ele assumiu que a substância de trabalho, equivalente à mistura ar-combustível no motor de combustão interna que utilizamos, é um gás ideal, cuja equação de estado térmica é dada por (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007):

$$PV = nRT, \quad (3.4)$$

sendo n o número de mols do gás e R a constante universal dos gases. Ele considerou também que o gás estava contido em um cilindro com um único pistão, semelhante ao motor que utilizamos, mas as paredes do cilindro não eram consideradas como condutoras térmicas em todos os processos do ciclo (NOGUEIRA, 2020). Ou seja, ele exclui teoricamente a possibilidade de dissipação de energia através de calor.

Figura 3.14 – Diagrama da pressão P em função do volume V para o Ciclo de Carnot. Este é composto por dois processos isotérmicos ab e cd , cujas isotermas são caracterizadas pelas temperaturas T_1 e T_2 das fontes quente e fria, respectivamente, e dois processos adiabáticos bc e da , em que $Q = 0$. A energia obtida da fonte quente no processo ab através de calor é Q_1 e a energia dissipada para a fonte fria no processo cd é dada por Q_2 . A área cinza do ciclo fechado representa a quantidade de energia térmica convertida em energia mecânica W através de trabalho. As isotermas plotadas são do tipo $PV = k(T)$ e as adiabáticas $PV^\gamma = k(S)$, sendo S a entropia. O coeficiente adiabático utilizado foi $\gamma = 5/3$, característico para gases monoatômicos ideais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela equação (3.4) obtemos diretamente que $PV = k(T)$ para um processo isotérmico (T constante), sendo $k(T)$ uma constante que depende da temperatura.

Se um gás ideal sofre um processo de compressão ou expansão adiabática tem-se que,

$$PV^\gamma = k(S), \quad (3.5)$$

com a constante $k(S)$ sendo dependente da entropia S do sistema, que é mantida constante em um processo adiabático. Esta propriedade física será definida mais adiante. O coeficiente adiabático γ neste caso é característico para gases monoatômicos ideais, dado por $\gamma = 5/3$ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Como $\gamma > 1$, uma adiabática decai mais rapidamente que uma isoterma no diagrama PV , conforme mostrado na figura 3.14.

Dessa forma, o ciclo de Carnot é iniciado com uma expansão isotérmica ab , veja figura 3.14. Como o gás está em contato térmico com a fonte quente de temperatura T_1 , este absorve a energia Q_1 através de calor durante a expansão. Se pensarmos na estrutura do cilindro do motor que utilizamos, este processo é equivalente ao movimento descendente do pistão, causado pela expansão do gás. Como o gás empurra o pistão para baixo, energia térmica é convertida em energia mecânica W_{ab} através de trabalho.

No processo de expansão adiabática bc da figura 3.14, nenhuma energia é adquirida ou perdida pelo gás no interior do cilindro, como se o mesmo fosse isolado termicamente para a realização deste processo. Consequentemente, a temperatura do gás diminui para T_2 durante a

expansão. Neste processo mais energia térmica é convertida em energia mecânica W_{bc} através de trabalho, com o pistão sendo empurrando mais ainda para baixo.

No processo cd o gás é colocado em contato térmico com a fonte fria, sendo comprimido pelo pistão isotermicamente à temperatura T_2 . Durante a compressão do gás a energia mecânica W_{cd} do pistão é convertida em energia térmica Q_2 através de trabalho, a qual é fornecida à fonte fria através de calor para manter a temperatura do gás constante.

O ciclo de Carnot é finalizado com a compressão adiabática do gás no processo da . A temperatura do mesmo é elevada para T_1 devido à conversão de energia mecânica W_{da} em energia térmica.

Como o trabalho neste caso é descrito por $\int_C PdV$, sendo C o caminho, ou o processo realizado em um diagrama PV , como o apresentado na figura 3.14, este será dado pela área sob a curva de cada processo. No ciclo fechado de Carnot, o trabalho resultante de todos os quatro processos é dado pela área cinza representada na figura 3.14 no interior do ciclo, ou seja,

$$W = \oint PdV = \int_a^b PdV + \int_b^c PdV + \int_c^d PdV + \int_d^a PdV = \text{Área do ciclo.} \quad (3.6)$$

Nos processos em que ocorre a compressão do gás a variação no volume é negativa, ou seja, $dV < 0$, pois o volume final é menor que o volume inicial. Nestes processos energia mecânica do pistão é convertida em energia térmica do gás. Para a expansão do gás tem-se $dV > 0$, com energia térmica do gás sendo convertida na energia mecânica do pistão. Como o ciclo é estabelecido no sentido horário no diagrama PV , a conversão de energia térmica em energia mecânica através de trabalho é positiva, ou seja, $W > 0$. Neste caso energia útil é obtida do motor.

Para o ciclo de Carnot é possível mostrar que (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, p. 678, 2007),

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (3.7)$$

de maneira que a eficiência da máquina de Carnot η_c pode ser reescrita a partir da equação (3.3) como:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3.8)$$

Com a expressão (3.8) Carnot mostrou que a eficiência de uma máquina reversível independe da substância de trabalho utilizada, sendo determinada apenas pelas temperaturas

das fontes quente e fria. Isso é equivalente a dizer que a eficiência de um motor independe do tipo de combustível utilizado.

A equação (3.8) também nos permite concluir que se houver superaquecimento do motor, como no caso da válvula termostática do sistema de arrefecimento não abrir, a eficiência do motor vai a zero à medida que a fonte fria é aquecida, ou seja, $T_2 \rightarrow T_1$. O resultado obtido por Carnot também nos permite concluir que à medida que a diferença $T_2 - T_1$ aumenta, maior será a eficiência do motor. A temperatura ambiente no Brasil varia em média entre 20 e 30 °C, o que forneceria uma fonte fria com temperatura em torno de $T_2 = 300\text{ K}$, de maneira que o esforço para aumentar a eficiência de um motor térmico seria direcionado para aumentar a temperatura da fonte quente T_1 .

Para que um motor tenha eficiência de 100%, seria necessário que a fonte fria operasse no zero absoluto $T_2 = 0\text{ K}$, mas este tipo de fonte é inconcebível (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Isso mostra que mesmo para um motor térmico ideal é impossível obter eficiência térmica de 100%.

3.2.5.2 Entropia

A relação apresentada na equação (3.7) só é válida para um motor térmico reversível, em que não há fluxo espontâneo de energia através de calor em seu ciclo de trabalho. Esta pode ser reescrita como $Q_2/T_2 = Q_1/T_1$, mostrando que a razão Q/T para a fonte quente é a mesma para a fonte fria neste caso.

Para um motor real, como o que utilizamos, operando em um ciclo de trabalho irreversível, a quantidade de energia térmica convertida em energia mecânica W_{irr} será menor que a mesma para um motor reversível W_{rev} , ou seja, $W_{irr} < W_{rev}$, para a mesma quantidade de energia Q_1 fornecida pela fonte quente através de calor. Como já discutido, isso é esperado devido às perdas de energia que provocam o aquecimento da carcaça do motor e outras partes do sistema, por exemplo. Pela equação (3.3) tem-se,

$$\frac{W_{irr}}{Q_1} < \frac{W_{rev}}{Q_1} \rightarrow \eta_{irr} < \eta_{rev},$$

ou seja, a eficiência de um motor térmico real é sempre menor que a eficiência da máquina reversível ideal de Carnot. Dessa forma, o ciclo de Carnot nos fornece um limite superior, ou máximo, para a eficiência de uma máquina térmica. Pelas equações (3.3) e (3.8) obtemos,

$$\eta_{irr} < \eta_{rev} \rightarrow 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{Q_2}{Q_1} &< -\frac{T_2}{T_1}, \\
 \therefore \frac{Q_1}{T_1} &< \frac{Q_2}{T_2}.
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

A razão Q/T é definida como a mudança da entropia ΔS do sistema quando energia é transferida através de calor à temperatura constante (BREITHAUPT, 2000). Da equação (3.7) já mostramos que $Q_2/T_2 = Q_1/T_1$, de maneira que $\Delta S = S_2 - S_1 = 0$. Isso significa que para uma máquina operando em um ciclo de trabalho reversível não há mudança na entropia do sistema, pois a perda de entropia da fonte quente é igual ao ganho de entropia da fonte fria. Já no caso de um motor real, irreversível, a equação (3.9) mostra que $S_2 > S_1$, de maneira que $\Delta S > 0$. Logo, o ganho de entropia na fonte fria de um motor térmico real é maior do que a perda de entropia na fonte quente.

Mas o que significa ganhar ou perder entropia?

Nos processos adiabáticos não existe transferência de energia através de calor $Q = 0$. Conseqüentemente, a entropia nestes processos se mantém constante, uma vez que $\Delta S = Q/T$, justificando o porquê de termos considerado a constante $k(S)$ da equação (3.5) como sendo dependente da entropia. Estes processos também são conhecidos como *isentrópicos*. Vimos que esse resultado $\Delta S = 0$ também é observado para o ciclo de Carnot, pois o ciclo é reversível, não havendo espalhamento ou fluxo espontâneo de energia através de calor. Isso significa que se fosse possível um motor operar com o ciclo de Carnot, este nunca teria sua carcaça aquecida, pois não há desperdício ou gasto de energia no cilindro para o seu próprio aquecimento.

Portanto, a entropia mede o quanto a energia proveniente da fonte quente é espalhada através de calor em uma determinada temperatura, sendo desperdiçada e impossibilitada de ser convertida em energia mecânica através de trabalho. Dessa forma, quando ocorre a explosão da mistura na câmara de combustão do nosso motor, a energia que escoar através das paredes do cilindro para o bloco, para o ar e outras partes do motor ou do veículo através de calor, não pode ser drenada de volta para a câmara para ser convertida em energia mecânica, pois como já discutido, os processos em que ocorre o fluxo espontâneo de energia através de calor são irreversíveis. Logo, a entropia pode ser vista também como a medida da irreversibilidade de um processo. Quanto maior a entropia, maior será o desperdício de energia através de calor em uma determinada temperatura e conseqüentemente, menor será a eficiência do motor. O resultado $\Delta S > 0$ é conhecido como a *lei do aumento da entropia*.

3.2.5.3 Os quatro tempos do motor utilizado e o ciclo de Otto

Após todas as discussões e conceitos apresentados nas seções anteriores, podemos agora descrever e entender, do ponto de vista da Termodinâmica, como é o ciclo de trabalho do motor de combustão interna que utilizamos.

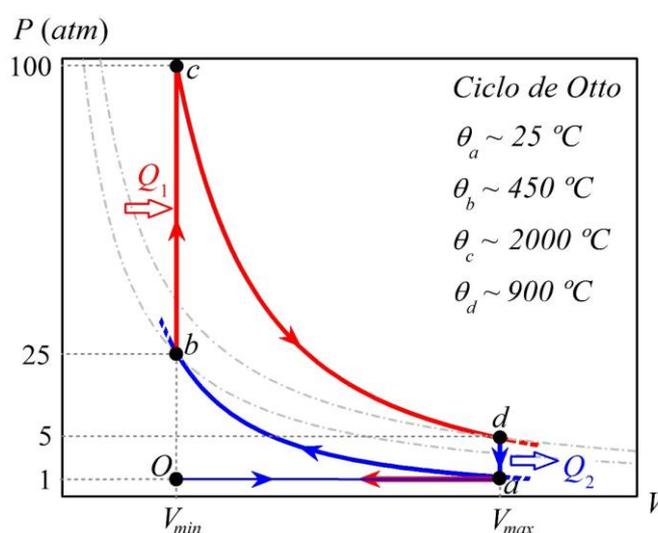
Como discutido na seção 3.2.1.1 o motor que utilizamos é um motor de combustão interna de ignição por centelha, com um único pistão e funciona com ciclo de trabalho de quatro tempos. Em cada ciclo o pistão é movido para cima duas vezes e para baixo duas vezes, representando os quatro tempos do motor. A substância de trabalho deste motor é a mistura ar-gasolina e os processos termodinâmicos em seu ciclo de trabalho podem ser aproximados pelo *Ciclo de Otto ideal*.

O ciclo desenvolvido em um cilindro de um motor de combustão interna é muito complexo. Quando a mistura ar-combustível é inserida no cilindro, ela é misturada com uma quantidade residual das substâncias provenientes da combustão do ciclo anterior. Dessa forma, quando a mistura é comprimida e o processo de combustão é realizado, há uma mudança na composição dos produtos na exaustão, consistindo em sua maior parte em dióxido de carbono CO_2 , água H_2O , nitrogênio N_2 e outros gases em menor quantidade. Após um processo de expansão, a válvula de exaustão é aberta e estes gases são expelidos para fora do cilindro, configurando um ciclo aberto com mudanças na composição da substância de trabalho. Para tornar a análise termodinâmica do ciclo do motor viável, o ciclo real é aproximado por um ciclo ideal em que é considerado ar como substância de trabalho, de maneira semelhante ao que foi desenvolvido por Carnot (PULKRABEK, 1997).

Dessa forma, a mistura ar-gasolina no motor que utilizamos é tratada como ar para todo o ciclo de trabalho, com o ar sendo considerado como um gás ideal. A análise com o ciclo fechado é mais simplificada do que com o ciclo aberto real. Neste caso, assumimos que o ar que é expelido do cilindro na exaustão e realimenta o sistema na admissão. O processo de combustão é substituído pela adição da energia Q_1 no sistema através de calor por uma fonte quente interna, pois o ar sozinho não entra em combustão. A exaustão, que é um processo aberto, é substituído por um processo fechado em que há a rejeição de energia Q_2 para a fonte fria. Uma vez que o ciclo de trabalho do motor que utilizamos é da ordem de 10^{-2} segundo, os processos envolvidos no mesmo podem ser aproximados por processos ideais reversíveis, como isovolumétricos, isobáricos e adiabáticos. Portanto, a análise termodinâmica que fazemos para o ciclo de trabalho do motor que utilizamos, dado pelo ciclo de Otto, é semelhante ao que foi feito na seção 3.2.5.1 para o ciclo de Carnot.

O ciclo de Otto recebeu este nome em homenagem a Nicolaus Otto que foi um dos primeiros desenvolvedores deste tipo de motor. O ciclo ideal para um motor de quatro tempos, naturalmente aspirado, como o que utilizamos, é apresentado na figura 3.15. Este é o ciclo da maioria dos motores de automóveis.

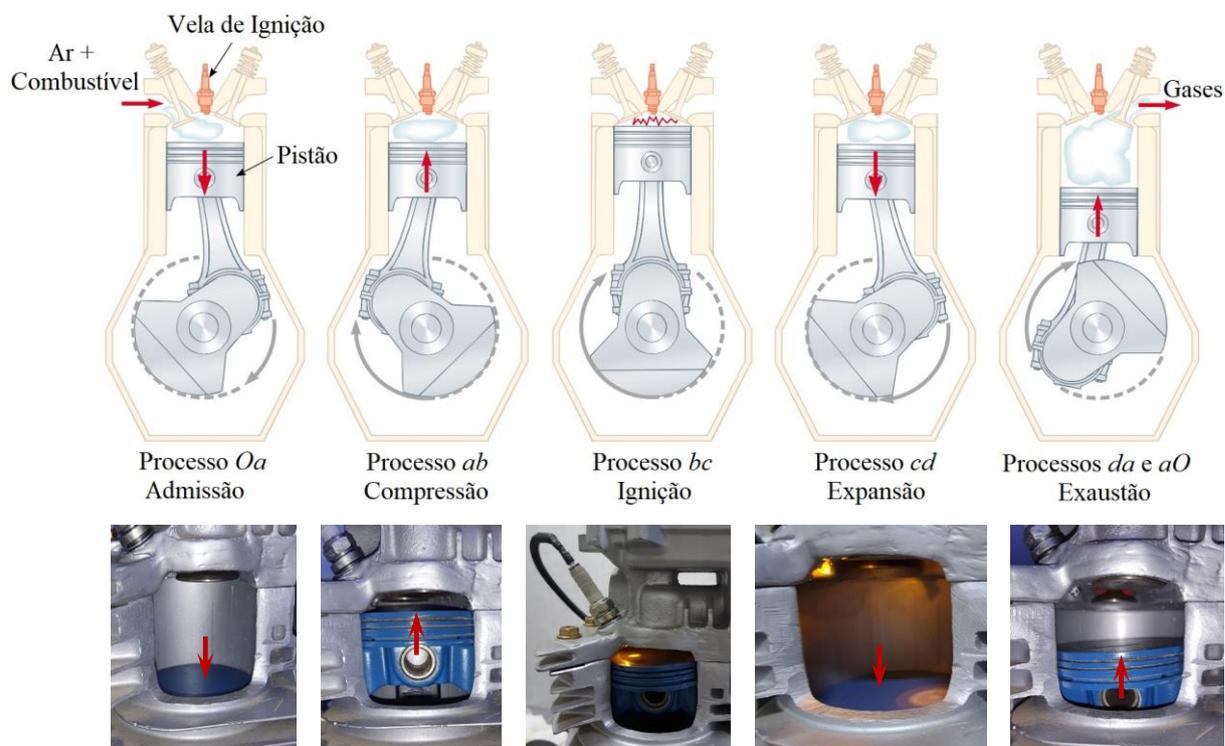
Figura 3.15 – Diagrama PV do ciclo de trabalho de Otto ideal, mostrando os 6 processos termodinâmicos que representam aproximadamente o funcionamento do motor de combustão interna que utilizamos. Os processos apresentados são: Oa – admissão da mistura ar-gasolina; ab – compressão adiabática da mistura; bc – ignição da mistura (fonte quente), provocando uma compressão isovolumétrica; cd – expansão adiabática dos gases provenientes da combustão da mistura; da – descompressão da câmara pela abertura da válvula de exaustão (fonte fria) e aO – exaustão. As isotermas (curvas tracejadas pontilhadas) que passam pelos pontos b e d mostram que $\theta_b < \theta_d$. Estas e as adiabáticas são do mesmo tipo que aquelas apresentadas na figura 3.14.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ciclo do motor começa com o pistão na posição de volume mínimo (V_{min}), ou volume morto, da câmara de combustão, obtido com a altura máxima que o pistão alcança, também conhecido como Ponto Morto Superior (PMS) ou TDC, do inglês *Top-Dead-Center*. Nesta posição as válvulas de admissão e exaustão no cabeçote estão fechadas. Quando o pistão desloca-se para baixo em seu *primeiro tempo*, a válvula de admissão é aberta e tem-se o início do processo de admissão Oa no diagrama PV do ciclo de Otto apresentado na figura 3.15. Este é aproximado por um processo isobárico à pressão atmosférica de 1 atm e temperatura ambiente ($\theta_a \approx 25^\circ C$). Para facilitar a visualização dos tempos do motor durante os processos termodinâmicos descritos na figura 3.15, apresentamos na figura 3.16 ilustrações das posições do pistão (parte superior) junto com fotos das mesmas (parte inferior) para o pistão do nosso motor.

Figura 3.16 – Os quatro tempos do motor de combustão interna utilizado, descritos pelas setas vermelhas, conforme os processos termodinâmicos do ciclo de Otto ideal apresentado na figura 3.15.



Fonte: Superior: Figura adaptada de Halliday, Resnick e Walker (p. 680, 2007). Inferior: Elaborado pelo autor.

O segundo tempo do motor é iniciado com o pistão na posição de Ponto Morto Inferior (PMI) ou BTC (*Bottom-Dead-Center*), que caracteriza o volume máximo (V_{max}) da câmara de combustão. O pistão move-se para cima comprimindo adiabaticamente a mistura ar-gasolina no processo ab , idealizado na figura 3.15. Neste processo há um aumento significativo da pressão e da temperatura da mistura, em torno de 25 atm e $450 \text{ }^\circ\text{C}$ no ponto b , respectivamente. Este é seguido por uma compressão isovolumétrica bc no diagrama PV para representar o processo de combustão da mistura.

Durante a combustão a mistura adquire uma grande quantidade de energia através de calor, representada por Q_1 , fazendo com que os picos de pressão e temperatura do ciclo sejam atingidos no ponto c , em torno de 100 atm e $2.000 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente.

Este aumento significativo de energia no sistema com o pistão na posição PMS faz com que o terceiro tempo do motor seja iniciado. A alta pressão na câmara força o pistão a descer violentamente de volta para a posição PMI, conforme figura 3.16, convertendo parte da energia térmica Q_1 da combustão em energia mecânica W_{cd} através de trabalho, provocando a rotação do virabrequim. Este processo de expansão no motor real é representado pelo processo adiabático cd do ciclo de Otto na figura 3.15. Durante o mesmo os valores da pressão e da

temperatura no cilindro diminuem à medida que o volume aumenta, atingindo os respectivos valores de 5 atm e 900 °C no ponto *d*, aproximadamente.

O terceiro ciclo é finalizado quando o pistão retorna à posição PMI, ponto *a* do ciclo de Otto, com a abertura da válvula de exaustão. Esse procedimento faz com que os gases no cilindro sejam expelidos para a atmosfera devido à diferença de pressão entre a câmara e o ambiente. Tanto a pressão quanto a temperatura são reduzidas drasticamente, em boa aproximação, para as condições ambientais de 1 atm e 25 °C devido à expansão dos gases. Como já discutido, este processo é aberto em um motor real, mas é representado no ciclo de Otto ideal da figura 3.15 pelo processo isovolumétrico *da* fechado, com a transmissão da energia Q_2 para a fonte fria do motor.

As cores azul e vermelha no ciclo de Otto da figura 3.15 foram utilizadas, respectivamente, para representar as menores e maiores temperaturas atingidas no ciclo. Para deixar isso mais claro plotamos duas isotermas passando pelos pontos *b* e *d* mostrando que $\theta_b < \theta_d$. Como isso não é muito bem definido nas partes do motor real, uma vez que há muitas variações de temperatura no sistema, nós pintamos o duto de admissão na cor azul, para sugerir baixas temperaturas, pois este recebe a mistura à temperatura ambiente, e o duto de exaustão em vermelho, para representar altas temperaturas, uma vez que os gases provenientes da combustão são expelidos através do mesmo. No caso do motor que utilizamos, o processo de combustão interna é a fonte quente do sistema. Como os balacins são responsáveis por abrir e fechar as válvulas de admissão e exaustão através do comando de válvulas, estes também foram pintados nas cores respectivas, como mostrado nas fotos da figura 3.17.

No *quarto tempo* do motor o pistão é movido para cima com a válvula de exaustão aberta, veja figura 3.16, para a expulsão de todos os gases provenientes da combustão. Quando este atinge a posição PMS o virabrequim terá realizado duas revoluções, a válvula de exaustão é fechada, a de admissão aberta e um novo ciclo de trabalho é iniciado. No ciclo de Otto ideal este processo é representado pelo processo isobárico *dO*, conforme figura 3.15.

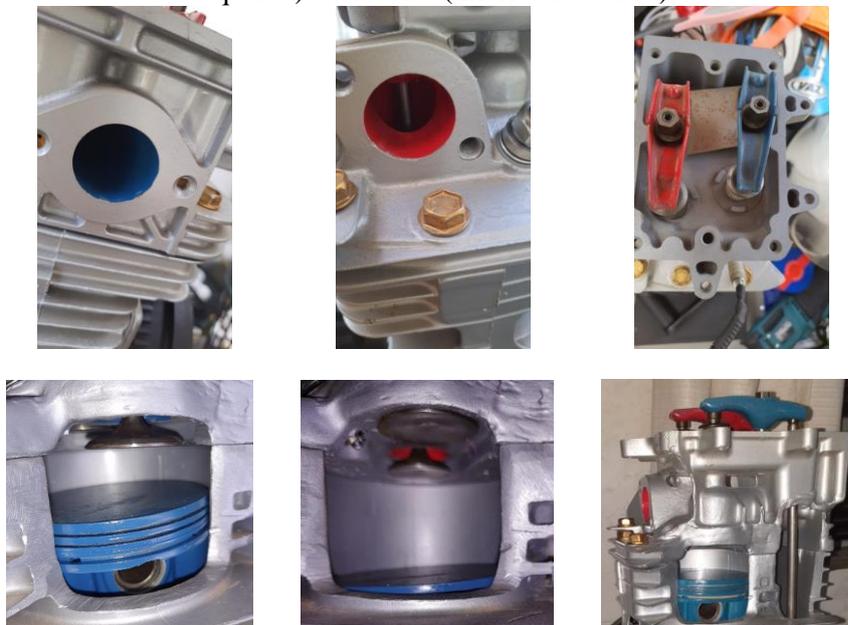
Se a substância de trabalho ar-gasolina for considerada como um gás ideal é possível mostrar que a eficiência η_o de um motor operando com o ciclo de trabalho de Otto é dada por:

$$\eta_o = 1 - \frac{1}{(V_{max}/V_{min})^{\gamma-1}} , \quad (3.10)$$

conforme Halliday, Resnick e Walker (p. 681, 2007). A razão entre o volume máximo V_{max} da câmara, dado pela posição PMS do pistão, e o seu volume mínimo V_{min} , com o pistão na posição PMI, é conhecida como taxa de compressão $r_c = V_{max}/V_{min}$. Dessa forma, a eficiência térmica do motor de Otto ideal só depende deste parâmetro. Considerando $\gamma = 1,35$, a eficiência

térmica η_O pode atingir valores acima de 50% com o aumento de r_C (PULKRABEK, 1997). Este resultado está bem acima da eficiência térmica de motores reais a gasolina, a qual varia entre 15 e 20%. Esta diferença é esperada devido aos efeitos dissipativos como a existência de atrito, fluxo espontâneo de energia através de calor pelas paredes do cilindro, provocando o aquecimento de todo o bloco do motor e sua vizinhança, combustão incompleta da mistura ar-gasolina, entre outros.

Figura 3.17 – Fotos mostrando o duto de admissão na cor azul à esquerda, o duto de exaustão em vermelho no centro, pintados para fornecer uma representação visual para os estudantes das menores e maiores temperaturas, respectivamente, do ciclo de Otto. Os balancins à direita também foram pintados nas respectivas cores, pois são responsáveis pela abertura das válvulas de admissão (inferior à esquerda) e exaustão (inferior no centro).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se fosse possível conceber um volume mínimo nulo $V_{min} = 0$ na câmara de combustão do motor teríamos um rendimento de 100% com o motor de Otto ideal, conforme a equação (3.10). A impossibilidade de verificação deste resultado é análoga à obtida para o motor de Carnot se considerarmos a temperatura de zero absoluto $T_2 = 0 K$ na fonte fria, pois ambos são fisicamente inconcebíveis. Um volume mínimo nulo na câmara significaria a desintegração da mistura ar-gasolina. Isso não é possível porque os átomos que compõem tal mistura possuem um volume mínimo e o sistema neste volume torna-se incompressível.

Sugestão de abordagem: para a apresentação da Segunda Lei da Termodinâmica e a análise termodinâmica do ciclo de trabalho Otto do motor que utilizamos, sugerimos que o professor utilize a sequência de tópicos apresentada nesta seção. Esta pode ser desenvolvida através de um método socrático, com o professor promovendo a reflexão e a descoberta pelos

estudantes com o uso de questões norteadoras durante o diálogo. No texto acima apresentamos alguns exemplos de questões que podem ser exploradas pelo professor. Com exceção das integrais apresentadas na equação (3.6), todo o restante do texto e das equações foram preparados em uma linguagem facilitada para o professor utilizar diretamente em suas aulas como sugestão de abordagem.

Para o estabelecimento da relação entre o ciclo de Carnot e o ciclo de Otto ideal, durante a análise termodinâmica do ciclo de trabalho do motor, é muito importante que o professor ilustre os conceitos diretamente no motor, como apresentado nas fotos da figura 3.16. Nesta figura é possível notar a vantagem de utilizarmos um motor monocilíndrico, pois os quatro tempos de um motor de combustão interna é usualmente explicado com diagramas com um único cilindro. Com o nosso motor é possível fazer uma transposição didática direta do que é tratado teoricamente em comparação com um sistema real.

O professor pode ainda explorar assuntos complementares comuns no cotidiano dos alunos durante a discussão dos processos termodinâmicos envolvidos no ciclo de trabalho, como a eficiência de motores movidos com diferentes combustíveis como álcool, gasolina, diesel e gás natural, ou motores de combustível flexível (*Flex*) que utilizam tanto álcool quanto gasolina, sobre biocombustíveis e a importância de outras fontes de energia para a proteção do meio ambiente, sobre o que são as cilindradas de um motor e também sobre outros conceitos de Física envolvidos na descrição do movimento do pistão e outras partes do motor.

Ao falar sobre o terceiro tempo do motor, por exemplo, é natural surgir a seguinte pergunta: se o terceiro tempo é responsável pela conversão de energia térmica em mecânica no motor, de onde é proveniente a energia que faz com que o motor realize os dois primeiros tempos quando o pistão do motor ainda está parado?

Se pensarmos em um veículo, como o trator cortador de grama que utiliza o motor cujo ciclo de trabalho foi analisado, a primeira coisa que fazemos para acionar o mesmo é dar a partida. Ao ligarmos a chave do veículo acionamos o seu *motor de arranque*, dado por um motor elétrico alimentado por uma bateria. Esta é a fonte de energia inicial para impulsionar o pistão do motor quando ele ainda está parado. Se o sistema estiver funcionando de maneira adequada o pistão continua o seu movimento por inércia, sem a necessidade da intervenção do motor de arranque. É por isso que um veículo não funciona quando sua bateria está descarregada, pois não é possível fazer o pistão se mover no motor para realizar a admissão da mistura e também para produzir a centelha que provoca a combustão da mesma através da vela de ignição. Em veículos com injeção eletrônica e outros dispositivos eletrônicos, a situação é

ainda pior, pois estes dependem da energia elétrica fornecida pela bateria para desenvolver e regular várias funcionalidades no motor.

Quando forçamos o motor do veículo a girar, fazemos o papel do motor de arranque. Esse procedimento é conhecido como *dar um tranco* no veículo. Existe um dispositivo chamado de *alternador automotivo* que faz com que a energia mecânica gerada pelo movimento do motor seja convertida em energia elétrica para recarregar a bateria e alimentar os componentes eletrônicos e elétricos do veículo, como as velas de ignição. Após o tranco, se o problema for só a bateria descarregada, é possível restabelecer o funcionamento do motor. O tranco faz com que o motor sofra um impacto muito grande que pode sobrecarregar o sistema e causar sérios danos nos cilindros. Este procedimento deve ser evitado não só pelo comprometimento da configuração mecânica do motor, pois com a evolução de tecnologia os veículos são equipados atualmente com vários dispositivos eletrônicos que podem ser ainda mais danificados caso o motor seja forçado a funcionar em uma pane. O mais recomendável a se fazer nesta situação é procurar um serviço especializado.

Com relação ao movimento do pistão e outras partes do motor o professor pode utilizar nosso motor para abordar conteúdos de Mecânica como na conversão do movimento linear de sobe e desce do pistão no movimento circular do virabrequim, o conceito de força, torque e potência do motor, entre outros.

Capítulo 4

METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO

Neste capítulo apresentamos como a nossa sequência didática foi organizada para a discussão dos tópicos apresentados no capítulo anterior com o uso do motor de combustão interna e como a mesma foi aplicada em sala de aula.

4.1 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Nossa sequência didática foi elaborada com o intuito de discutir conceitos fundamentais da Termodinâmica como calor, trabalho, temperatura e energia e como estes podem ser contemplados em um contexto aplicado, com o uso de uma tecnologia muito presente no cotidiano dos alunos, dada por um motor de quatro tempos devidamente preparado para ser utilizado como ferramenta didática.

A sequência didática foi organizada em três momentos:

- Atividade 1: Levantamento do conhecimento prévio dos estudantes;
- Atividade 2: Discussão dos conceitos de Termodinâmica com o uso do motor;
- Atividade 3: Discussão das respostas do questionário de múltipla escolha;

A primeira atividade foi destinada para a apresentação do projeto e para fazer um levantamento do conhecimento prévio dos estudantes através de um questionário diagnóstico, fornecido aos alunos no início da atividade. Como os alunos já eram, a princípio, familiarizados com o tema, esta atividade foi pensada para ter um caráter de revisão. Em seguida, na atividade 2, os mesmos conceitos foram trabalhados de maneira mais aprofundada com o auxílio do motor

de combustão interna. Nosso propósito foi organizar o conhecimento discutido na atividade 1 em um contexto aplicado para poder trabalhar melhor outros conceitos como os ciclos termodinâmicos ideais de Carnot e de Otto, para a definição de rendimento de uma máquina térmica, e como o ciclo de Otto em um diagrama *PV*, que é o ciclo de trabalho do motor utilizado, pode ser interpretado na realidade através do movimento do pistão do motor. A atividade 2 foi importante para a discussão de conceitos que usualmente não são definidos de maneira correta, do ponto de vista científico, nos livros didáticos, como calor, trabalho, energia e entropia. Quando estes são considerados, a abordagem é feita usualmente de maneira muito abstrata ou matematicamente, sem um significado físico satisfatório que possa ser traduzido em um contexto aplicado.

Além do questionário diagnóstico, apresentado aos estudantes no início da atividade 1, no final da atividade 2 os estudantes foram convidados a responder um outro questionário para a aplicação dos novos conhecimentos adquiridos. A princípio o questionário diagnóstico seria aplicado novamente para efeito de comparação das respostas e análise dos resultados. Como não foi possível trabalhar com os mesmos estudantes do início ao final das atividades, optamos por aplicar um segundo questionário, considerando o mesmo como múltipla escolha com cinco alternativas, mas que contemplasse também as questões do questionário diagnóstico. Isso será melhor esclarecido na seção sobre a aplicação do produto educacional.

A aplicação da proposta foi finalizada com a atividade 3 para revisar e discutir as respostas apresentadas pelos estudantes, com o intuito de sanar dúvidas conceituais importantes que permaneceram durante a execução da atividade 2.

A metodologia de análise da aplicação de nossa sequência didática possui um caráter qualitativo, de natureza interpretativa, baseada na relação cooperativa e participativa dos estudantes durante a execução das atividades. Para o levantamento de dados, o áudio das aulas foram gravados integralmente e as respostas dos questionários foram obtidas a partir dos formulários do google.

As atividades propostas foram divididas em 4 aulas de 45 minutos. Os planos de aula da nossa sequência didática são apresentados a seguir considerando cada atividade separadamente.

4.1.1 Atividade 1: Levantamento do conhecimento prévio dos estudantes

Objetivos: Mapear o conhecimento prévio dos estudantes através de um questionário diagnóstico fornecido aos estudantes no início da aula e, através de uma roda de conversa,

desenvolver o tema proposto com as mesmas questões norteadoras, além de outras, presentes no questionário diagnóstico, principalmente relacionadas às Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica e sobre os conceitos de temperatura, calor, processos termodinâmicos e máquinas térmicas. Desenvolver estes conceitos utilizando uma terminologia científica apropriada. Introduzir e desenvolver teoricamente conceitos abstratos ou discutidos de maneira insatisfatória nos livros didáticos como trabalho, calor, energia e entropia.

Recursos utilizados: Material didático e quadro branco.

Tempo estimado: Uma aula de 45 minutos.

Desenvolvimento: Esta aula foi iniciada com a entrega do questionário diagnóstico aos alunos. Em seguida problematizações estabelecidas com questionamentos sobre o que é calor e o seu uso inadequado no cotidiano, o que é temperatura e que tipo de informação esta propriedade física nos fornece, o que são máquinas térmicas e processos termodinâmicos e como estes podem ser reconhecidos no cotidiano dos estudantes. Em seguida foi feita a formalização teórica destes conceitos do ponto de vista científico. A Primeira Lei da Termodinâmica foi introduzida para discutir o que é o princípio de conservação de energia, o conceito de energia de maneira geral, sua modalidade conhecida como energia interna e os métodos de transmissão de energia descritos pelo calor e pelo trabalho. A Segunda Lei da Termodinâmica é discutida no contexto de máquinas térmicas, abordado inicialmente, e em seguida é introduzido o conceito de entropia e o seu significado físico.

Avaliação: O professor pode considerar como avaliação a participação dos estudantes durante o desenvolvimento da atividade e questionários dissertativos para a aplicação do conhecimento. No nosso caso, como os alunos se recusaram a responder o questionário diagnóstico no início da aula, fornecemos o mesmo novamente ao final da aula, após a apresentação e desenvolvimento do conteúdo proposto. Devido a isso, consideramos o próprio questionário diagnóstico como avaliação para a aplicação do conhecimento desenvolvido.

4.1.2 Atividade 2: Discussão dos conceitos de Termodinâmica com o uso do motor

Objetivos: Desenvolver os conceitos da Termodinâmica discutidos na atividade 1 em um contexto aplicado, com o uso do dispositivo tecnológico dado pelo motor de combustão interna. Dar ênfase no ciclo de trabalho de Otto ideal, o qual descreve o funcionamento do motor utilizado, para fazer uma transposição direta do ciclo representado em um diagrama *PV*, com o movimento do pistão em cada tempo do motor.

Recursos utilizados: Material didático, motor monocilíndrico de combustão interna adequadamente preparado como ferramenta didática e quadro branco.

Tempo estimado: Duas aulas de 45 minutos.

Desenvolvimento: Esta atividade foi iniciada com um breve histórico sobre motores de combustão interna e como outros empreendimentos tecnológicos que ocorreram na época de seu surgimento, como a descoberta do petróleo bruto e a invenção do pneumático, contribuíram para estimular a ampla utilização desses motores do início do século XX até os dias atuais. Esta apresentação foi importante para introduzir o motor monocilíndrico de combustão interna que utilizamos como ferramenta didática e justificar, de certa forma, a sua utilização para a discussão dos conceitos da Termodinâmica. Em seguida introduzimos a nomenclatura de todas as partes do motor e a função de cada componente no funcionamento do sistema para familiarizar os alunos com a tecnologia utilizada. Nesta parte discutimos como o funcionamento do motor seria simulado para explicar os quatro tempos de trabalho do mesmo, utilizando uma manivela para movimentar o pistão e uma pequena lâmpada de LED para simular a centelha para a explosão da mistura ar-combustível na câmara de combustão.

Na sequência, as mesmas problematizações estabelecidas na atividade 1 foram feitas para que os questionamentos sobre o que são calor, trabalho, temperatura, energia, máquinas térmicas, etc., fossem contemplados através do funcionamento do nosso motor. A expressão matemática da Primeira Lei da Termodinâmica pôde ser apreciada através do funcionamento do motor em um ciclo de trabalho, para mostrar que a energia térmica proveniente da explosão da mistura ar-combustível é convertida em outras modalidades. Essa discussão pode ser útil para introduzir o que são processos termodinâmicos e a Segunda Lei da Termodinâmica, mostrando que a eficiência de uma máquina térmica não poder ser maior ou igual a 100%. Em seguida o ciclo de trabalho de Carnot foi apresentado em um diagrama *PV* no quadro branco para definir a eficiência máxima de uma máquina térmica reversível. O diagrama do ciclo de trabalho de Otto ideal foi discutido em seguida, mostrando cada processo do diagrama *PV* no movimento do pistão do motor. Durante tal exposição é interessante discutir as diferenças entre o ciclo de Otto ideal, que é fechado e tem como substância de trabalho um gás ideal como o ar, e o ciclo real de funcionamento do motor, o qual é aberto e tem como substância de trabalho a mistura ar-combustível e os gases provenientes da combustão. Na sequência foi feito um paralelo entre a taxa de compressão do motor real, a qual estabelece a razão entre o volume máximo e o volume mínimo da câmara de combustão, para calcular sua eficiência, com a razão entre as temperaturas absolutas da fonte fria e da fonte quente para calcular a eficiência máxima de uma máquina térmica, dada pela máquina de Carnot. A abordagem do conceito de entropia

com o motor real foi deixado por último para que este conceito fosse explorado e apreciado fisicamente após os estudantes terem adquirido familiaridade com a terminologia dos conceitos fundamentais da Termodinâmica e das partes do motor.

Durante a exposição dos conceitos, discussões para ampliar o conhecimento dos alunos foram conduzidas de maneira mais superficial, sobre o ciclo de trabalho de Diesel, diferentes combustíveis, motores híbridos, a importância de outras fontes de energia para a proteção do meio ambiente e outros conceitos da Física envolvidos na descrição do movimento do pistão e outras partes do motor. A atividade foi finalizada com curiosidades e discussões sobre informações gerais sobre o funcionamento de um motor, como a importância do motor de arranque e da bateria para iniciar o funcionamento e o ciclo de trabalho do motor, possíveis panes que podem acontecer no motor e os procedimentos adequados a serem realizados.

Ao final da atividade os alunos foram convidados a responder um questionário de múltipla escolha disponibilizado nos formulários do google para que as respostas fossem discutidas na atividade 3.

Avaliação: Consideramos como avaliação a participação dos estudantes durante o desenvolvimento da atividade e o questionário de múltipla escolha. O professor pode ainda propor atividades em grupo para que os alunos possam realizar investigações sobre os tópicos trabalhados com o uso do motor de combustão interna real. Apesar de não termos desenvolvido nenhuma atividade desse tipo, os estudantes ficaram livres para analisar e utilizar o motor real no final da atividade. Eles demonstraram grande empolgação neste momento, de maneira que uma atividade com o motor real, como a mencionada, poderia ser muito interessante e produtiva do ponto de vista pedagógico.

4.1.3 Atividade 3: Discussão das respostas do questionário de múltipla escolha

Objetivos: Revisitar e discutir as respostas apresentadas pelos estudantes referentes ao questionário de múltipla escolha apresentado ao final da atividade 2, com o intuito de sanar dúvidas conceituais importantes que permaneceram durante a exposição dos conceitos com a utilização do motor de combustão interna.

Recursos utilizados: Material didático, motor monocilíndrico de combustão interna adequadamente preparado como ferramenta didática e quadro branco.

Tempo estimado: Uma aula de 45 minutos.

Desenvolvimento: Esta atividade foi iniciada apresentando de maneira geral algumas respostas inconsistentes relacionadas ao questionário de múltipla escolha, contendo 10 questões

e 5 opções de resposta, apresentado aos alunos no final da atividade 2. Em seguida retornamos na questão 1 e continuamos na sequência até a última questão, para discutir a consistência de todas as alternativas apresentadas em cada questão, com o objetivo de desenvolver a percepção dos estudantes com relação à resposta correta. Em todas as discussões utilizamos o motor de combustão interna real na tentativa de facilitar o entendimento do que estava sendo perguntado.

Avaliação: Como nesta atividade foi feita uma discussão geral sobre as respostas de um questionário, consideramos como avaliação apenas a participação dos estudantes durante o desenvolvimento da atividade.

4.2 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O nosso produto educacional foi aplicado em uma escola pública, situada na cidade de Itu no interior de São Paulo. Esta escola possui uma boa estrutura física para o ensino com quadra poliesportiva, espaços multimídias, laboratório de ciências e de informática. Esta unidade escolar passou por algumas mudanças com a transição para o programa de ensino integral. Como consequência, houve uma substancial perda de alunos que cursavam o ensino médio, principalmente pelo horário das aulas, que passou a ser das 14h15 até as 21h15.

Apesar do ensino básico estar em um processo de adequação e transição para o estabelecimento do Novo Ensino Médio, com o material didático sendo fornecido pela secretaria de educação de maneira gradual, não tivemos nenhum impedimento ou objeção por parte da direção e da coordenação da escola para prosseguirmos com o nosso trabalho.

A proposta foi desenvolvida no segundo semestre letivo de 2021. Devido à pandemia do novo coronavírus (COVID-19) as aulas estavam sendo realizadas exclusivamente no formato remoto. A partir do dia 20/09/2021 parte das aulas começaram a ser realizadas presencialmente, com limitações de alunos para manter o distanciamento mínimo de 1,5 m entre as carteiras e o uso obrigatório de máscaras. Todas as atividades deste projeto foram realizadas presencialmente no laboratório da escola. Apesar de ser um espaço destinado a experimentações, este não possui nenhuma estrutura de equipamentos para esta finalidade. Como nosso produto não apresenta nenhum tipo de risco que comprometa a integridade física dos estudantes, este pode ser utilizado tanto em laboratório quanto em uma sala de aula convencional.

A proposta foi aplicada para duas turmas, A e B, do 2º ano do ensino médio com faixa etária entre 16 e 18 anos. Cada turma tinha 30 estudantes regularmente matriculados. O retorno presencial das atividades na escola foi marcado por um número muito reduzido de alunos, devido à pandemia e também à transição para o programa de ensino integral, como já mencionado. Por isso, decidimos juntar as duas turmas para desenvolver as atividades. Como o número total de estudantes era 60, a princípio, houve muita variação durante o desenvolvimento das atividades, ou seja, a maioria dos estudantes que compareciam em uma atividade não eram os mesmos nas outras atividades. Isso também aconteceu durante a aplicação dos questionários, que foram disponibilizados aos estudantes via formulários do google. Houveram estudantes que responderam aos mesmos, mas não compareceram nas atividades presenciais. Isso dificultou a nossa coleta de dados para a análise de resultados, pois não foi possível desenvolver o nosso projeto em sala de aula com os mesmos estudantes do início ao final das atividades. Outro problema que tivemos que enfrentar foi a crise de abastecimento de água que ocorre na cidade de Itu todos os anos. No ano de 2021 esta crise se deu durante o retorno presencial das atividades escolares. Nos dias que não havia água na escola nem para fazer a refeição dos estudantes, tínhamos que dispensar os mesmos. Isso nos forçou a considerar um intervalo de até três semanas entre o desenvolvimento de uma atividade e outra.

O convite para a participação do nosso projeto foi feito aos estudantes do 2º ano do ensino médio através do grupo do *WhatsApp* das turmas A e B no dia 14/10/2021. O professor informou os estudantes sobre os objetivos do projeto e como seria a participação deles durante o desenvolvimento das atividades. Foi informado que registros das aulas seriam feitos através de áudios e transcrições das atividades e das respostas que eles forneceriam para os questionários aplicados, sendo assegurado a privacidade e o sigilo dos dados coletados, de maneira que o nome de nenhum estudante seria exposto e nem o nome da escola. Adicionalmente, foi informado que os estudantes não eram obrigados a participar das atividades e que nenhuma penalidade com relação a notas e a avaliação do bimestre seria aplicada, caso eles decidissem por não participar.

Uma semana depois, a aplicação da proposta foi iniciada com a Atividade 1 sendo realizada no dia 21/10/2021, na terceira aula das 16 às 16h45. A Atividade 2 teve que ser realizada duas semanas depois, no dia 04/11/2021 na terceira e quarta aulas, das 16h00 às 17h30, e a Atividade 3 foi realizada três semanas depois da Atividade 2, no dia 25/11/2021, na terceira aula das 16 às 16h45. Todas as atividades foram realizadas nas aulas de quinta-feira. Os intervalos entre uma atividade e outra ocorreram por causa da crise hídrica já mencionada.

Os dois questionários aplicados aos estudantes foram respondidos através dos formulários do google, o primeiro nas duas semanas que antecederam a Atividade 2 e o segundo durante as três semanas que antecederam a atividade 3.

A seguir descrevemos como a nossa sequência didática foi desenvolvida em sala de aula com os estudantes.

4.2.1 Primeiro questionário

No dia 21/10/2021 iniciamos a primeira atividade de nossa sequência didática, presencialmente, com a aplicação de um questionário diagnóstico, fornecido no início da aula, composto pelas três questões:

- 1 – O que é temperatura?
- 2 – O que é calor?
- 3 – O que são máquinas térmicas?

Este questionário deveria ser respondido de maneira discursiva e individualmente nos primeiros 15 minutos de aula para mapearmos o conhecimento prévio dos estudantes sobre o assunto, se eles tinham concepções alternativas sobre os conceitos de calor e temperatura, cujas terminologias são amplamente utilizadas no cotidiano, e se eles sabiam diferenciar tais conceitos. A terceira questão foi estabelecida para verificar se os estudantes eram capazes de associar o conceito de máquina térmica com tópicos da Termodinâmica que já haviam sido trabalhados com eles no 9º ano do ensino fundamental, nas aulas de ciências, e no 1º ano do ensino médio.

Neste dia haviam 18 estudantes presentes, mas todos se recusaram a responder o questionário discursivo, com a maioria alegando que não lembrava dos conceitos. Em seguida negociamos com os estudantes para desenvolvermos o tema proposto naquela aula, utilizando as três questões do questionário diagnóstico para nortear as discussões e solicitamos que eles respondessem o questionário em casa. Eles concordaram e o questionário foi disponibilizado on-line aos alunos através dos formulários do google pelo link:

<https://forms.gle/aLmDMwA73uwdFuAm6>

4.2.2 Desenvolvimento do tema proposto

A discussão sobre os conceitos de Termodinâmica foi conduzida oralmente pelo professor. Os estudantes tinham liberdade para fazer intervenções sempre que quisessem para tirar dúvidas ou fazer comentários.

Começamos falando que, com a Física podemos analisar diferentes tipos de movimento. Movimentos mais simples de um único corpo, como uma bolinha caindo no chão, e também movimentos mais complexos, de muitos corpos, como o movimento dos átomos que constituem um gás. Estendemos a discussão do movimento de muitos corpos para sistemas sólidos e líquidos. Muitos estudantes demonstraram conhecimento sobre o movimento dos átomos em um corpo sólido, mesmo este mantendo sua forma e volume para diferentes temperaturas. Com isso foi possível introduzir o que é movimento térmico, dado pela agitação coletiva das partículas constituintes de um corpo, e que este movimento coletivo é o objeto de estudo de sistemas termodinâmicos. Ressaltamos que este movimento é responsável por várias características importantes de sistemas sólidos, líquidos e gasosos observadas através de parâmetros que podem ser medidos experimentalmente como a temperatura, por exemplo. Ao perguntarmos o *que é temperatura*, a maioria dos estudantes responderam que é *“a medida de calor de um corpo”* ou *“a quantidade de quente ou frio de um corpo”*.

Em seguida associamos a temperatura de um corpo com o seu movimento térmico, de maneira que a mesma está relacionada com a intensidade desse movimento, ou de maneira mais simplificada, com o grau de agitação molecular do corpo. A partir disso, os estudantes aceitaram naturalmente que a temperatura era um parâmetro interno do sistema e quando a mesma não sofre alterações, significa que o sistema está em um estado de equilíbrio térmico. O equilíbrio termodinâmico foi discutido logo em seguida, com a explicação sobre o que era equilíbrio químico e mecânico de um sistema.

Na sequência introduzimos os conceitos de calor, trabalho e energia, aproveitando o que foi exposto sobre temperatura. Começamos pedindo para que cada aluno esfregasse o dedo indicador na carteira e dissesse o que acontecia. Praticamente todos disseram que esquentava. Ao pedir para que justificassem o porquê que aquilo acontecia, alguns alunos responderam: *“porque o movimento faz o dedo ganhar calor”*. Diante disso, o professor continuou perguntando: *Mas o que é calor?*

Algumas respostas foram dadas em relação a sensações térmicas como *“é a quantidade de quente de um corpo”*, *“é o grau do mormaço de um corpo ou de um lugar”* ou *“é quando está quente, por que quando isso acontece dizemos que está calor”*.

Após algumas discussões foi explicado que calor é o método ou forma pela qual energia era transferida de um corpo para outro devido à diferença de temperatura entre os mesmos. Esse momento foi interessante para explicar o que é energia, como uma propriedade física que todos os corpos possuem e que pode ser observada quando um corpo interage com outro. Um aluno perguntou, “*mas como é possível observar a energia?*”. O professor respondeu que a sua manifestação pode ser observada com os nossos próprios olhos em alguns casos, como na colisão de dois automóveis, a qual gera barulho e deformações devido à interação entre os mesmos, ou através de dispositivos de medida, como um termômetro, que nos permite medir a temperatura dos corpos. Se a temperatura de algum corpo aumentar ou diminuir significa que energia foi absorvida ou perdida pelo corpo, respectivamente.

Para discutir o que é trabalho utilizamos novamente o exemplo de esfregar o dedo sobre a mesa. Perguntamos como é possível vislumbrar o conceito de trabalho neste caso, mas nenhum estudante respondeu. Continuamos dizendo que o trabalho é outro método pelo qual energia é transferida de um corpo para outro, mas esta transmissão se dava através de uma força aplicada ao longo de uma distância. Colocamos a expressão matemática, conhecida por eles, para o trabalho de uma força mecânica na lousa, dada pela força vezes o deslocamento provocado por aquela força e eles aparentemente compreenderam melhor. Isso ficou ainda mais claro ao empurrar uma cadeira dizendo que ela se movia porque o professor estava transferindo energia para a mesma através da força aplicada pelo seu braço. Ao aplicar uma força vertical eles notaram que não havia movimento e por isso não era possível transferir energia para a cadeira através daquela força porque ela não se movia e não sofria qualquer alteração em sua estrutura.

O princípio de conservação de energia, ou Primeira Lei da Termodinâmica, foi discutido com o auxílio da expressão matemática da mesma descrita por $Q = \Delta U + W$, em que definimos a modalidade de energia dada pela energia interna ou energia térmica. Com esta expressão iniciamos a discussão sobre como o princípio de conservação de energia podia ser analisado em uma máquina térmica, como uma máquina a vapor. Para isso iniciamos com a pergunta: *o que é um motor térmico ou máquina térmica?*

Alguns alunos responderam que “*é um motor que trabalha com temperatura*”, “*uma máquina de calor*” ou que “*é um motor que funciona com vapor*”. Após a exposição das respostas explicamos que um motor é um dispositivo que converte uma ou mais formas de energia, como energia elétrica, energia térmica, etc., em energia mecânica. Um aluno perguntou: “*Professor, energia mecânica está associada com a mecânica de um carro?*” Respondemos que a energia mecânica é uma modalidade de energia definida na Física

relacionada com a energia de movimento de um corpo e que a mecânica de automóveis estava relacionada às peças e processos do motor de um veículo para colocá-lo em movimento, o que não inclui partes externas como a lataria, a pintura, os pneus, o parabrisa e outros vidros e a parte elétrica do veículo. Isso foi útil para dizer que a energia interna ou térmica é outra modalidade relacionada ao aquecimento ou resfriamento de um corpo.

Na sequência explicamos que uma máquina térmica utiliza a energia de uma fonte térmica para produzir movimento. Como exemplo, continuamos com a máquina a vapor, que possui uma fonte de energia térmica dada por uma caldeira e que essa energia (Q) era transmitida ao sistema através de calor e convertida em energia de movimento (W) através de trabalho, mas que esta conversão não pode ser total, pois toda a carcaça e as peças da máquina são aquecidas neste processo e esse aquecimento é descrito pela variação da energia interna ΔU , justificando, portanto, a equação apresentada na lousa.

Aproveitamos a discussão sobre o processo de aquecimento para introduzir o que são processos termodinâmicos e a impossibilidade de conversão total de energia térmica em mecânica para introduzir a Segunda Lei da Termodinâmica a partir do conceito de eficiência de uma máquina térmica. Para isso utilizamos um diagrama de máquina térmica, como o apresentado na figura 3.13.

A partir deste momento a maioria dos estudantes assistiram passivamente a aula, com alguns respondendo apenas as questões que o professor fazia à turma. Apresentamos o ciclo de Carnot na lousa discutindo o que era um processo cíclico em uma máquina térmica e sua eficiência máxima, para mostrar a importância da existência de diferença de temperatura neste tipo de dispositivo, pois a energia só pode fluir espontaneamente através de calor quando tem-se diferentes temperaturas no processo.

Prosseguimos com curiosidades sobre o funcionamento do motor de um automóvel, elencando algumas partes como a câmara de combustão, o pistão, entre outros, o uso de diferentes combustíveis, o rendimento de carros que funcionam a álcool e a gasolina, motores *flex* e porque o rendimento de um automóvel é tão baixo, em torno de 20%. Isso foi importante para falarmos sobre processos irreversíveis, que explica a dissipação de energia em um motor para introduzir o conceito de entropia.

Ao abordar esse conceito, todos os estudantes presentes disseram que nunca tinham ouvido falar sobre o mesmo. Finalizamos então dizendo que a entropia era um parâmetro que nos permitia medir o quanto de energia térmica era espalhada ou desperdiçada a partir da fonte de energia do sistema, como a caldeira da máquina a vapor ou a câmara de combustão do motor

de um veículo, e que esta energia era impossível de ser reaproveitada completamente para ser convertida em energia de movimento do sistema.

A atividade 1 foi finalizada com o professor solicitando novamente que os estudantes respondessem o questionário discursivo, contendo as três perguntas abordadas na aula, e que este seria disponibilizado através dos formulários do google pra eles enviarem as respostas até a próxima aula para avaliação e melhor direcionamento da atividade 2.

4.2.3 Análise das respostas do primeiro questionário

Quando preparamos a atividade 1 para ser aplicada em sala de aula, acreditamos que esta teria um caráter de revisão, pois os alunos já eram, a princípio, familiarizados com o tema. Para mapear o conhecimento prévio deles, elaboramos um questionário diagnóstico para analisar o que eles sabiam sobre os conceitos de temperatura, calor e máquinas térmicas. Uma vez que todos os alunos presentes se negaram a responder o questionário no início da aula, o mesmo foi aplicado ao final da aula após a discussão das perguntas apresentadas no questionário, dentre outros tópicos da Termodinâmica.

Dentre os 18 estudantes que estavam presentes na primeira atividade, apenas 8 responderam o questionário. Contudo, tivemos 15 estudantes que responderam a questão 1 e 19 estudantes que responderam as questões 2 e 3, ou seja, a maioria das respostas foram de estudantes que não estavam presentes na primeira atividade.

Nós avaliamos as questões em corretas, incorretas e parcialmente corretas. Consideramos como respostas parcialmente corretas, respostas incompletas mas que foram elaboradas de maneira consistente, e respostas com algumas terminologias utilizadas em situações inoportunas. Forneceremos exemplos destas respostas para as questões 2 e 3 do questionário diagnóstico.

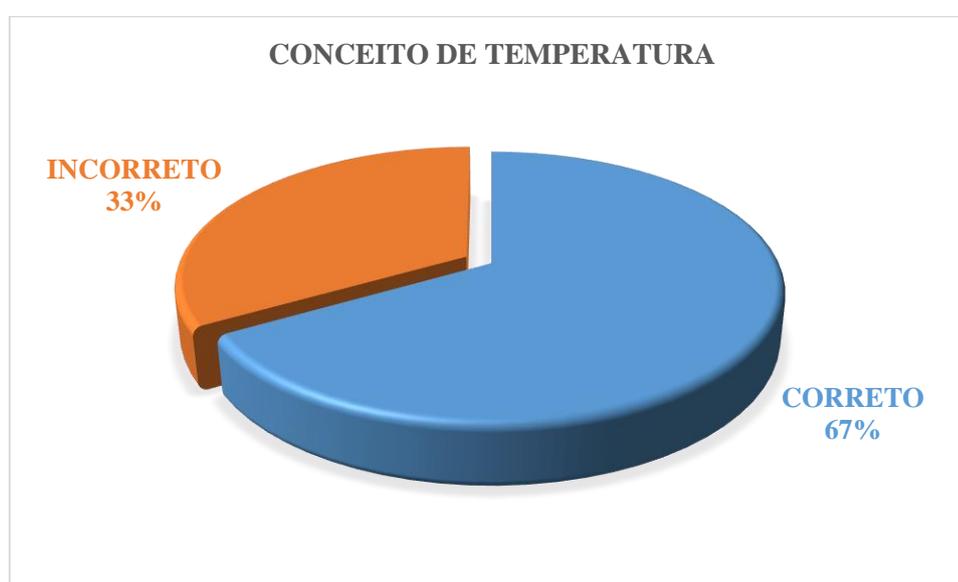
Na figura 4.1 apresentamos a porcentagem de respostas corretas e incorretas fornecidas pelos alunos para questão 1, sobre o conceito de temperatura. Nesta questão não houve respostas parcialmente corretas.

Dos 15 estudantes que responderam essa questão, 67% responderam de maneira adequada, associando a temperatura ao grau de agitação das moléculas constituintes do sistema. Os 8 estudantes que compareceram à atividade 1 responderam esta questão corretamente. A seguir mostramos, respectivamente, dois exemplos de respostas corretas (*a.1* e *b.1*) e dois de respostas incorretas (*c.1* e *d.1*). Estas retratam de maneira geral as respostas fornecidas.

- a.1 - Nível de agitação das moléculas de um corpo;*
b.1 - Uma grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõem um corpo, quanto mais agitadas as partículas de um corpo, maior será sua temperatura;
c.1 - Calor, frio, mormaço;
d.1 - Calor de um corpo, grau de calor ou frio do lugar (ambiente).

Pelas respostas incorretas é possível notar que alguns alunos não conseguiram fazer uma distinção entre os conceitos de temperatura, calor e sensação térmica.

Figura 4.1 – Gráfico mostrando a porcentagem de respostas corretas e incorretas da primeira questão do questionário aplicado ao final da atividade 1, sobre o conceito de temperatura. 15 estudantes responderam essa questão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Isso fica ainda mais evidente com as respostas da questão 2, sobre o conceito de calor. Pelo gráfico apresentado na figura 4.2, mais de 70% dos alunos não conseguiram fornecer uma definição adequada, do ponto de vista da Termodinâmica, para o calor. Dentre os 8 estudantes presentes na primeira atividade, 2 responderam corretamente, 3 parcialmente e 3 incorretamente. Dois exemplos de respostas corretas (*a.2* e *b.2*), parcialmente corretas (*c.2* e *d.2*) e incorretas (*e.2* e *f.2*) são transcritas abaixo, respectivamente:

- a.2 - É uma forma ou o método pelo qual a energia é transferida de um corpo a outro, devido a diferença de temperatura entre eles;*
b.2 - É a transferência de energia entre corpos que possuem temperaturas distintas;
c.2 - É a forma ou método pelo qual a energia é transferida de um corpo para o outro;
d.2 - Calor é a energia que é transferida espontaneamente entre corpos em diferentes temperaturas;
e.2 - É a transferência de temperatura entre dois corpos ou dois sistemas;

f.2 - Qualidade, estado ou condição do que é quente ou está aquecido; temperatura (relativamente) alta.

As respostas parcialmente corretas mostram que alguns alunos responderam de maneira incompleta, como em *c.2*, por não especificarem a condição em que ocorre a transferência de energia através de calor, que é devido à diferença de temperatura entre os dois corpos envolvidos no processo, ou responderam de maneira incorreta, como em *d.2*, ao escrever que calor é a energia transferida. Esta última remete a muitos livros didáticos que definem calor como “*energia em trânsito*”, conforme discutido no capítulo anterior. A definição correta de calor é contemplada nas respostas *a.2* e *b.2*. Todos os estudantes que não compareceram à primeira atividade responderam incorretamente atribuindo o conceito à temperatura e à sensações térmicas, conforme *e.2* e *f.2*.

Figura 4.2 – Gráfico mostrando a porcentagem de respostas corretas, parcialmente corretas e incorretas da segunda questão do questionário aplicado ao final da atividade 1, sobre o conceito de calor. 19 estudantes responderam essa questão.



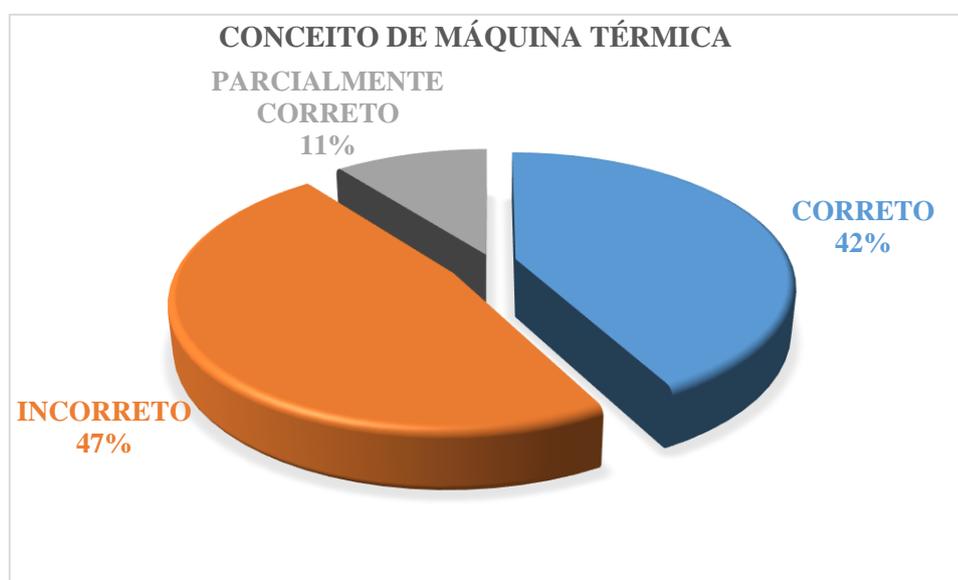
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na terceira questão, as respostas corretas e parcialmente corretas foram focadas no processo de transformação de energia térmica em mecânica, enquanto que a maioria das respostas incorretas foram aleatórias. O gráfico da figura 4.3 mostra que aproximadamente 50% dos alunos responderam esta questão de maneira inadequada. Transcrevemos abaixo dois exemplos de respostas corretas (*a.3* e *b.3*), apenas um de resposta parcialmente correta (*c.3*), pois as únicas duas respostas que foram dadas nesta categoria foram iguais, e dois exemplos de respostas incorretas (*d.3* e *e.3*).

- a.3 - É todo dispositivo que trabalhando em ciclo, transforma calor em trabalho;
- b.3 - Máquina térmica, em Termodinâmica, é aquela integrada num sistema que realiza a conversão de calor em trabalho mecânico;
- c.3 - São dispositivos que absorvem calor de uma fonte e convertem-no parcialmente em energia mecânica;
- d.3 - É o estado das temperaturas e suas escalas;
- e.3 - Máquinas que fazem energia através do calor.

Pelas respostas corretas (a.3 e b.3) é possível notar que os estudantes deram ênfase na conversão entre os métodos de transmissão de energia, calor e trabalho, e não necessariamente nas respectivas modalidades de energia, térmica e mecânica. Durante a abordagem do assunto nesta atividade discutimos este conceito utilizando as duas formas. Todos os 8 alunos que compareceram à atividade 1, e apenas estes, responderam corretamente. Na resposta parcialmente correta (c.3) os alunos escreveram incorretamente “*absorção de calor de uma fonte*”, como se o mesmo fosse uma substância que pudesse transitar entre um sistema e outro. Já nas respostas incorretas, não foi possível estabelecer uma linha de raciocínio ou padrão entre as mesmas, pois as respostas foram completamente aleatórias.

Figura 4.3 – Gráfico mostrando a porcentagem de respostas corretas, parcialmente corretas e incorretas da terceira questão do questionário aplicado ao final da atividade 1, sobre máquinas térmicas. 19 estudantes responderam essa questão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É interessante notar que os alunos que compareceram à atividade 1 conseguiram assimilar a maioria dos conceitos transmitidos de maneira satisfatória, com exceção do conceito sobre o calor, devido provavelmente, à terminologia e a forma inadequada que este assunto é

tratado nos livros didáticos. Os outros estudantes que faltaram à aula apresentaram inconsistências em suas respostas semelhantes às aquelas apresentadas pelos alunos presentes durante o desenvolvimento da atividade em sala de aula.

4.2.4 Utilização do motor de 4 tempos

A atividade 2 foi desenvolvida no dia 04/11/2021 em duas aulas geminadas de 45 minutos. Nas duas semanas anteriores, que os estudantes tiveram que ser dispensados devido à crise hídrica, o professor comunicou novamente aos mesmos que levaria um motor de combustão interna de 4 tempos real para discutir os conceitos de Termodinâmica trabalhados na aula anterior. Esse comunicado foi feito na tentativa de atrair mais estudantes para as aulas e funcionou. Esta atividade foi desenvolvida com 25 estudantes. Dos 8 estudantes que compareceram na primeira atividade, 5 estavam presentes na atividade 2. Dentre os outros 20 estudantes, pelo menos 9 responderam alguma das questões do primeiro questionário.

Os estudantes ficaram vislumbrados com o motor de 4 tempos real devidamente preparado para as aulas de Física. Todos que entravam no laboratório paravam brevemente próximo à bancada do professor para olhar de perto o motor. Antes de começar a aula, o professor permitiu que eles dessem uma olhada rápida, de dois em dois estudantes por causa das restrições de distanciamento impostas pela pandemia de COVID-19, para mexer na manivela e ver o movimento do pistão.

A sequência didática desenvolvida na atividade 2 foi iniciada com o professor apresentando a proposta, dizendo que os mesmos conceitos que foram abordados teoricamente na aula anterior seriam abordados naquela aula com o uso de tecnologia, para mostrar como os conceitos de Física podem ser contemplados na prática através de um dispositivo bastante presente no cotidiano dos estudantes. Foi falado também que antes de começar a discussão sobre os conceitos de Física, o professor ia apresentar um pouco sobre a história dos motores de combustão interna, como eles se consolidaram no início do século XX para inúmeras aplicações até os dias atuais, sobre a nomenclatura de todas as partes do motor e a função de cada componente no funcionamento do sistema, para familiarizar os alunos com a tecnologia utilizada e facilitar a discussão sobre o seu funcionamento.

Durante tal exposição a curiosidade dos estudantes ficou voltada quase que exclusivamente para o dispositivo, a forma como foram feitos os cortes para mostrar o movimento do pistão e as cores das peças. Eles acharam muito interessante a utilização da lâmpada de LED para simular a centelha para a explosão da mistura ar-combustível na câmara de combustão,

com alguns dizendo que não imaginavam que a explosão do combustível é que fazia o pistão se mexer. Outros nem sabiam que existia um pistão que se movia verticalmente, porque a roda do carro girava, realizando um movimento bem diferente. Diante de tais curiosidades explicamos o movimento do pistão e do virabrequim fazendo uma analogia entre a perna de um estudante e o pedal de uma bicicleta, com a perna se movendo na vertical como o pistão e esse movimento sendo convertido na rotação da coroa da bicicleta, como o virabrequim, para colocar a bicicleta em movimento como um carro, com as rodas girando.

Alguns estudantes também fizeram perguntas técnicas sobre partes do motor, sua utilidade ou funcionamento como: “*O que é a junta do cabeçote e por que ela queima?*” O aluno que fez esta pergunta disse que o pai dele havia falado que a junta do cabeçote do carro deles havia queimado. Essa pergunta foi respondida com base na experiência técnica do professor, que atua como mecânico há mais de 20 anos, utilizando a terminologia científica exigida em um curso de Física.

Em seguida utilizamos a sequência de problematizações elencada na atividade 1, mas sempre dando ênfase no funcionamento do motor real. A discussão dos conceitos foi feita seguindo a mesma sequência de tópicos apresentada no capítulo 3, iniciando com a definição de movimento térmico através da explicação de como a carcaça do motor como um todo era aquecida a partir do momento que o motor começava o seu funcionamento. O conceito de calor foi discutido de maneira bastante satisfatória através do mecanismo de condução, sendo possível descrever o que são materiais bons condutores térmicos, como o metal, e materiais isolantes térmicos, como o plástico e o ar. O conceito de temperatura surgiu naturalmente a partir dos próprios alunos ao falar do aquecimento do sistema, com eles dizendo que a temperatura do mesmo aumentava.

Os conceitos de energia e trabalho foram apresentados conforme sugerido na seção 3.2.3, com demonstrações repetitivas do acionamento do pistão através da manivela, mostrando como a energia era transferida do pistão para o virabrequim através de trabalho por intermédio da biela e como o sistema de transmissão fazia o automóvel entrar em movimento da maneira que conhecemos. Durante a explosão destes conceitos os estudantes praticamente não fizeram intervenções, mas eles se mantiveram atentos à explicação do professor com o uso do motor.

Continuamos mostrando como a Primeira Lei da Termodinâmica, ou o princípio de conservação de energia, poderia ser contemplado através do funcionamento do motor. Ao escrever a equação $Q = \Delta U + W$ tentamos deixar claro que a energia fornecida durante o processo de explosão era a energia térmica dada por Q , enquanto que o movimento de todo o sistema estava relacionado à energia mecânica dada por W . Neste processo de conversão de

energia térmica em mecânica, ou de calor em trabalho, ocorria o aquecimento de toda a carcaça e peças do motor, que era traduzido na variação da energia interna ΔU do sistema.

A discussão sobre processos termodinâmicos, máquinas térmicas e a Segunda Lei da Termodinâmica foi iniciada com a equação da Primeira Lei fazendo-se $\Delta U = 0$ para explicar o que era um processo cíclico. Seguimos utilizando a mesma sequência e questionamentos apresentados na seção 3.2.5.

Ao falar sobre a baixa eficiência de um motor de combustão interna, fizemos a seguinte pergunta para introduzir o ciclo de Carnot: *Se um motor térmico não pode ter eficiência de 100%, qual é a sua eficiência máxima?* Mesmo os alunos que compareceram na primeira atividade não se manifestaram para tentar responder a pergunta.

Prosseguimos com a definição de processos irreversíveis e reversíveis e plotamos o diagrama PV na lousa para o ciclo de Carnot, junto com o esquema de uma máquina térmica, como na figura 3.13. Os estudantes ficaram intrigados com o processo adiabático, porque eles não conseguiam imaginar esse processo no motor de combustão interna real, uma vez que todo ele era feito de metal e este material era bom condutor térmico. Neste momento falamos sobre o quão rápido estes processos ocorriam no motor real, da ordem de 10^{-2} s, de maneira que não dava tempo para o sistema trocar energia através de calor, mesmo com as paredes da câmara de combustão sendo feitas de metal. De toda forma, explicamos que o processo não era perfeito e que dissipações de energia sempre ocorriam.

Após apresentarmos o rendimento máximo de Carnot de uma máquina térmica ideal, reversível, mostrando que mesmo nesta situação não era possível obter um aproveitamento de 100% de um motor, alguns estudantes insistiram com a pergunta: *“Mas professor, não tem nenhum motor que consegue aproveitar 100%?”* Voltamos na discussão com o diagrama de máquina térmica para mostrar pra eles que, mesmo em uma situação ideal, o sistema precisa consumir energia para reiniciar o ciclo.

Continuamos com o estabelecimento da relação entre o ciclo de Carnot e o ciclo de trabalho do motor utilizado, dado pelo ciclo de Otto. Para isso tratamos o ciclo de Otto de maneira ideal e fomos fazendo um paralelo com o ciclo real de trabalho do motor, que é aberto e não utiliza um gás ideal como substância de trabalho. Para facilitar as discussões plotamos o diagrama PV do ciclo de Otto na lousa, considerando as temperaturas reais em graus celsius em cada processo, e apresentamos todos os quatro tempos do motor detalhadamente, como mostrado na figura 3.16. A discussão sobre o ciclo de Otto foi finalizada com a expressão (3.10), para mostrar que era possível estimar o rendimento do motor utilizado, considerando os

volumes máximo e mínimo da câmara de combustão em analogia ao cálculo feito por Carnot, em que é considerado as temperaturas da fonte fria e da fonte quente.

A discussão sobre o que é entropia foi deixada por último, após insistirmos na impossibilidade de obtenção de 100% de rendimento com uma máquina térmica. Iniciamos com a pergunta: *Como vocês podem explorar o conceito de entropia no motor real?* Um dos alunos que compareceram na primeira atividade respondeu o seguinte: *“Ela mede a energia desperdiçada quando o motor é ligado. Então, pelo que eu entendi, se um motor esquenta muito é porque ele tá gastando muita energia. Mas eu não sei se isso faz aumentar ou diminuir a entropia dele!”* Continuamos a discussão dizendo que o aluno estava certo e explicamos o que era a lei do aumento da entropia, enfatizando que quando existem processos irreversíveis, como o processo de fluxo espontâneo de energia através de calor no motor, a entropia do sistema sempre aumenta.

Após essa discussão o professor deixou os estudantes livres para mexer no motor e ficou à disposição para discutir assuntos e curiosidades gerais, como outros ciclos de trabalho, como o de Diesel, como funciona o sistema de refrigeração de um motor real, sobre o atrito no motor e a importância do sistema de lubrificação, a utilidade do óleo como dissipador de energia através de calor para auxiliar no resfriamento do motor, ajustes e medidas utilizados durante a montagem de um motor, a utilidade do motor de arranque e da bateria, além de fornecer informações úteis para os alunos relacionadas às possíveis partes que podem acontecer em um motor e os procedimentos mais recomendados para resolver os problemas.

A utilização do motor de quatro tempos real foi útil também para resgatar alguns conceitos de Mecânica Clássica durante as discussões sobre os tópicos de Termodinâmica, como forças de atrito, movimento angular, torque, potência, entre outros.

Ao final da atividade os estudantes foram informados que um segundo questionário seria disponibilizado no google formulários para eles responderem individualmente, com o objetivo de avaliar a aplicação do conhecimento que eles adquiriram com as duas aulas.

4.2.5 Análise do segundo questionário

Nossa proposta inicial era fornecer novamente o questionário diagnóstico discursivo após a exposição dos conceitos com o uso do motor de quatro tempos real para comparação e análise dos resultados. Como os estudantes se recusaram a responder o questionário no início da primeira atividade e a maioria dos estudantes não frequentou as atividades 1 e 2, optamos

por um questionário de múltipla escolha para avaliar a aplicação do conhecimento fornecido aos estudantes na atividade 2.

Na segunda atividade nosso objetivo era realizar o aprofundamento do conhecimento apresentado na atividade 1 com o uso de tecnologia, mas devido às condições em que a mesma foi desenvolvida, ela teve um caráter de atividade inicial para a maioria dos estudantes presentes, justificando nossa escolha de aplicar um questionário de múltipla escolha no segundo momento do projeto.

O questionário de múltipla escolha aplicado contém 10 questões com 5 opções de resposta, como descrito abaixo, sendo uma correta e as outras quatro incorretas. A resposta correta para cada questão está descrita em itálico. As primeiras três questões são as mesmas do questionário aplicado ao final da primeira atividade.

QUESTIONÁRIO FINAL

1 - O que é Temperatura?

- a) É a energia que se transmite de um corpo a outro em virtude de uma diferença de temperatura.
- b) Uma grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõe um corpo, quanto mais agitadas as partículas de um corpo, menor será sua temperatura.
- c) Energia térmica em trânsito.
- d) É uma forma de calor.
- e) *Uma grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõe um corpo, quanto mais agitadas as partículas de um corpo, maior será sua temperatura.*

2 - O que é Calor?

- a) Trata-se de um sinônimo de temperatura em um sistema.
- b) É uma forma de energia contida nos sistemas.
- c) *É a forma ou o método pelo qual energia é transferida de um corpo a outro, devido à diferença de temperatura entre eles.*
- d) É uma forma de energia superabundante nos corpos quentes.
- e) É uma forma de energia em trânsito, do corpo mais frio para o mais quente.

3 - O que são máquinas térmicas?

- a) Todo tipo de dispositivo que trabalhando em ciclo possui 100% de eficiência.
- b) Todo e qualquer dispositivo que transforma energia mecânica em qualquer outra forma de energia.
- c) É todo dispositivo que consegue movimentar outro dispositivo.
- d) *É todo dispositivo que opera ciclicamente e transforma calor em trabalho.*
- e) É aquele que não necessita de fonte de calor para gerar trabalho.

4 - O que estabelece a Primeira Lei da Termodinâmica?

- a) *É o princípio de conservação de energia e estabelece que um sistema pode ser aquecido ou resfriado pela transferência de energia do sistema para a vizinhança ou da vizinhança para o sistema através de calor ou trabalho, ou ambos.*
- b) Esta estabelece que o calor diminui proporcionalmente à medida que o trabalho será realizado.
- c) Que uma grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõe um corpo, quanto mais agitadas as partículas de um corpo, menor será sua temperatura.
- d) Que é possível construir uma máquina térmica operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar energia através de calor de uma fonte e convertê-la integralmente em outra modalidade através de trabalho.
- e) Estabelece que as transformações gasosas que sempre ocorrem com uma das variáveis de estado de um determinado gás, irá se manter constante.

5 - Dentre os mecanismos de transmissão de energia que existem, quais são os mais frequentes nas máquinas térmicas?

- a) *Condução e Convecção.*
- b) Calefação e Dissolução.
- c) Dissolução e Condução.
- d) Radiação e Calefação.
- e) Convecção e Radiação.

6 - O que é transformação adiabática?

- a) *É aquela em que não há trocas de energia através de calor entre o sistema e o meio exterior.*
- b) É a transformação gasosa em que a temperatura do sistema permanece constante.
- c) Ocorre quando uma massa fixa de determinado gás sofre variação no volume e na temperatura, mas a pressão mantém-se constante.
- d) Ocorre quando se mantém o volume constante e se variam a temperatura e a pressão de um gás com massa fixa.
- e) Transformações gasosas que sempre ocorrem sem manter nenhuma das variáveis de estado dos gases constante.

7 - Descreva o ciclo de Otto para um motor de combustão interna.

- a) O ciclo Otto é um ciclo de potência a vapor utilizado na análise de centrais termoelétricas.
- b) O ciclo ar padrão Otto é um ciclo de potência a gás que possui dois processos isoentrópicos e dois processos isotérmicos.
- c) O ciclo ideal de Otto é um ciclo de potência idealizado em que os processos de transferência de energia através de calor ocorrem de forma isentrópica.
- d) O ciclo ar padrão Otto é um ciclo ideal que considera que a adição de temperatura ocorre a volume constante.
- e) *O ciclo de Otto é descrito por dois processos isobáricos, dois isovolumétricas e dois adiabáticos ou isoentrópicos.*

8 - Quais são os estágios de funcionamento de um motor a combustão interna de Ciclo Otto?

- a) Combustão, compressão, exaustão e admissão
- b) *Admissão, compressão, explosão e exaustão*
- c) Explosão, compressão, exaustão e escape
- d) Admissão, explosão, compressão e exaustão
- e) Combustão, admissão, compressão e descarga

9 - A Primeira Lei da Termodinâmica estabelece que se transferirmos uma determinada quantidade de energia para uma máquina térmica, esta será a quantidade de energia total da máquina. O que isso significa?

- a) Que uma máquina térmica consegue funcionar em ciclo infinito até que alguém a faça parar.
- b) Que é possível que uma máquina térmica produza mais trabalho do que a energia nela colocada, isto seria conhecido como super aproveitamento de energia.
- c) *Que é impossível retirar mais energia de uma máquina térmica do que aquela que foi disponibilizada para o seu funcionamento. Este é conhecido como o princípio da conservação de energia.*
- d) Que uma determinada máquina pode produzir energia espontaneamente, se transformando em um gerador de energia.
- e) Que todas as máquinas térmicas têm um ciclo de funcionamento que pré-determina o quanto de trabalho ela irá produzir independente da energia que ela receba.

10 - A Segunda Lei da Termodinâmica pode ser enunciada da seguinte forma: "É impossível construir uma máquina térmica operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar energia através de calor de uma fonte e convertê-la integralmente em outra modalidade através de trabalho." Esse princípio nos leva a concluir que:

- a) Sempre se pode construir máquinas térmicas cujo rendimento seja 100%.
- b) Qualquer máquina térmica necessita apenas de uma fonte quente.
- c) Calor e trabalho são grandezas homogêneas.
- d) *A energia útil de qualquer máquina térmica é sempre menor que a energia inserida na mesma, de maneira que nenhuma máquina térmica pode ter rendimento maior ou igual a 100%.*
- e) Somente com uma fonte fria mantida sempre a 0 °C é possível converter integralmente calor em trabalho em uma máquina térmica.

Este questionário foi disponibilizado on-line através dos formulários do google para os alunos responderem no endereço:

<https://forms.gle/GQrzSrLjkezLEcZa8>

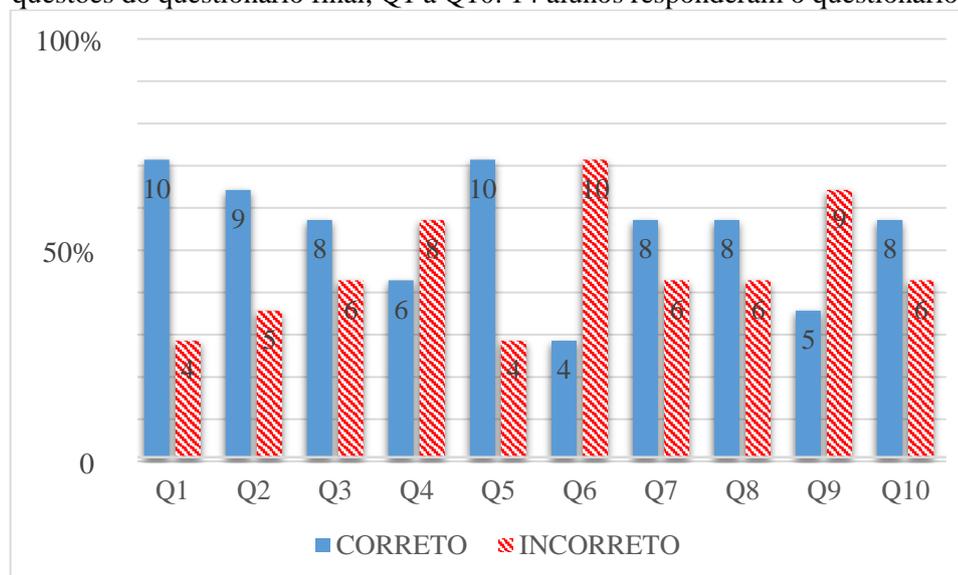
Dos 25 estudantes presentes na segunda atividade, 14 responderam o segundo questionário. Dentre estes, 3 estavam presentes na primeira atividade e responderam o primeiro questionário.

Na figura 4.4 apresentamos o número e a porcentagem correspondente de respostas corretas e incorretas para cada questão do questionário final. As questões são descritas por Q_n , com n variando de 1 a 10 para representar o número de cada questão.

Como já mencionado, as três primeiras questões são as mesmas feitas no primeiro questionário, com mais de 60% dos alunos respondendo de maneira satisfatória as duas primeiras, sobre os conceitos de temperatura e calor, respectivamente. Isso também é observado na questão Q5. Nas questões Q3, Q4, Q7, Q8 e Q10 a turma ficou praticamente dividida entre respostas corretas e incorretas. Na maioria destas questões não foi possível estabelecer um padrão de respostas incorretas, pois estas foram diversificadas. Apenas na questão Q10, sobre a Segunda Lei da Termodinâmica, 4 dos 6 alunos que responderam incorretamente optaram

pela alternativa *b*) (*qualquer máquina térmica necessita apenas de uma fonte quente*), mostrando que o enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei da Termodinâmica não foi assimilado por estes estudantes.

Figura 4.4 – Gráfico mostrando o número e a porcentagem de respostas corretas e incorretas das 10 questões do questionário final, Q1 a Q10. 14 alunos responderam o questionário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas questões Q6 e Q9, mais de 60% dos estudantes responderam de maneira incorreta. A questão Q6 é sobre a definição de um processo adiabático, descrito como um processo *em que não há trocas de energia através de calor entre o sistema e o meio exterior*. A maioria dos alunos que responderam incorretamente, descreveram esta transformação como um processo isobárico, que ocorre à pressão constante. A questão Q9 chamou nossa atenção porque esta é sobre a Primeira Lei da Termodinâmica, assim como a questão Q4. É possível notar que em ambos os casos a maioria dos alunos erraram, mostrando que estes não assimilaram de maneira satisfatória a essência das Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica na segunda atividade.

Vale ressaltar que os três estudantes que participaram da primeira e segunda atividades acertaram todas as questões do questionário de múltipla escolha.

4.2.6 Revisão dos conceitos apresentados no segundo questionário

A aplicação da nossa proposta foi finalizada presencialmente com a atividade 3, realizada no dia 25/11/2021 em uma aula das 16 às 16h45. Nosso objetivo foi estabelecer uma discussão sobre as respostas fornecidas pelos alunos no questionário final para revisar e discutir

de maneira mais detalhada os conceitos apresentados neste questionário, com o auxílio do motor real de quatro tempos.

A atividade foi desenvolvida com 22 estudantes, dentre os quais 16 eram os mesmos que participaram da segunda atividade e 6 que participaram da primeira atividade. Destes últimos, 3 participaram das três atividades e responderam os dois questionários e 3 participaram das atividades 1 e 3 e responderam apenas o primeiro questionário. Todos os estudantes dos 14 que responderam o segundo questionário estavam presentes na última atividade.

Esta atividade foi desenvolvida a partir de discussões sobre a inconsistência das respostas incorretas para cada questão do questionário, utilizando o motor de 4 tempos sempre que necessário. Novamente, a atenção dos estudantes ficou voltada principalmente para o dispositivo, seu funcionamento e as cores das peças. Quando discutíamos sobre algum tempo do motor ou processo de funcionamento do mesmo, eles apresentavam um bom entendimento técnico sobre a sequência do ciclo de trabalho de Otto, prevendo o movimento do pistão e como este era convertido no movimento do virabrequim. Contudo, quando elencávamos os conceitos de Física relacionados à Termodinâmica, com perguntas relacionadas à terminologia correta a ser utilizada, do ponto de vista científico, para os conceitos de temperatura, calor, trabalho, energia e entropia e como estes eram utilizados para a descrição da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, eles ficavam tímidos, se negando a responder.

Quando discutimos a questão 6 sobre o processo adiabático, percebemos que o maior problema era a terminologia. Praticamente todos os estudantes nomearam este processo como isobárico. Esta foi a questão que a maioria errou no segundo questionário. O mesmo foi observado para as questões 4 e 9, sobre a Primeira Lei da Termodinâmica.

A disciplina de Termodinâmica trás uma infinidade de conceitos muito grande da Física que apresentam sutilezas em sua descrição, além das Primeira e Segunda Leis. Além disso, conceitos como calor e temperatura são utilizados no cotidiano dos estudantes de maneira usualmente incorreta. O cenário torna-se ainda mais complexo pela forma inadequada que os livros didáticos abordam, e quando abordam, os conceitos de calor, trabalho, energia e entropia, que formam a base teórica da Termodinâmica.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho abordamos vários conceitos básicos de Termodinâmica, como movimento térmico, calor, trabalho, energia, Primeira e Segunda Leis, processos reversíveis e irreversíveis, entropia, ciclos termodinâmicos, entre outros, de maneira mais contextualizada para uma turma de ensino médio utilizando um dispositivo tecnológico dado por um motor real de combustão interna de quatro tempos, adequadamente preparado para ser utilizado como material didático em sala de aula.

Durante o desenvolvimento das atividades propostas foi possível observar que os estudantes tiveram um interesse especial sobre o dispositivo, seu funcionamento e a forma como o mesmo foi preparado para as aulas. Estas observações mostram que o uso de tecnologia para o ensino de Física pode, de fato, contribuir significativamente para tornar o mesmo mais atraente, ou mesmo relevante, conforme descrito na literatura (ELLERMEIJER; TRAN, 2019). A utilização do motor de combustão interna tornou o ensino dos tópicos de Termodinâmica mais próximo da vida dos alunos, com exemplos de situações que podem ocorrer no cotidiano dos mesmos, nos permitindo até mesmo fornecer informações e orientações sobre como lidar com possíveis problemas envolvendo panes em veículos.

Adicionalmente, os alunos tiveram a oportunidade de conhecer, através das discussões conduzidas pelo professor durante a exposição do assunto, sobre a profissão de mecânico de automóveis. Isso foi muito importante, pois os alunos da unidade escolar onde o produto foi aplicado são de uma comunidade muito carente, com poucos recursos e pouca perspectiva de emprego ou profissão para o público jovem. A escola fica localizada entre um conjunto habitacional desenvolvido pela Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) do Estado de São Paulo e uma favela. Usualmente, tudo o que é proposto fora do

cotidiano escolar destes alunos, como o uso de tecnologia para o ensino de Física, é bem recebido por eles. Portanto, com a aplicação do nosso produto educacional, os estudantes tiveram a oportunidade não só de ter um contato íntimo com um dispositivo tecnológico, mas também de vislumbrar uma opção de profissão, pois o professor de Física atua como mecânico há mais de 20 anos, tendo experiência suficiente para abordar tal assunto.

Com relação aos dados coletados e às respostas dos questionários não foi possível estabelecer uma análise criteriosa ou estatística sobre a evolução do conhecimento dos estudantes como consequência do estímulo fornecido desde a atividade 1 até a atividade 3, porque muitos estudantes não realizaram todas as atividades e não responderam os dois questionários para estabelecermos correlações e fazermos comparações. Isso ocorreu devido a vários fatores, como o retorno gradual das atividades presenciais por conta da pandemia de COVID-19, a desistência de muitos estudantes por causa da transição da escola em que a proposta foi aplicada para o programa de ensino integral e principalmente por conta da crise de abastecimento de água na escola durante a aplicação do projeto, fazendo com que os estudantes ficassem sem aulas por até três semanas entre uma atividade e outra.

Apesar disso, foi possível notar uma grande empolgação e curiosidade dos estudantes com a utilização do motor de quatro tempos para a discussão dos conceitos básicos da Termodinâmica. Contudo, tal empolgação ficou limitada à parte técnica, de funcionamento do motor. Com relação aos conceitos científicos da Termodinâmica, foi possível perceber pouca familiaridade dos estudantes com os conceitos básicos da disciplina como temperatura, calor, trabalho, energia, entropia e as Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, mesmo com os estudantes já tendo um primeiro contato com a disciplina e tópicos relacionados no 9º ano do ensino fundamental, nas aulas de ciências, e no 1º ano do ensino médio. À medida que as atividades foram desenvolvidas, percebemos também uma confusão entre os conceitos transmitidos. Isso se deve principalmente à quantidade muito grande de conceitos apresentados na disciplina de Termodinâmica, os quais são discutidos usualmente em poucas aulas, o que torna a sua assimilação mais dificultada, e também pelo fato de alguns destes conceitos, como calor e temperatura, serem utilizados de maneira incorreta no cotidiano dos estudantes. Outro agravante com relação a isso é a forma inadequada que os principais conceitos da Termodinâmica como calor, trabalho, energia e entropia são abordados nos livros didáticos.

Diante destas e outras observações, esperamos que nossa proposta seja útil para o professor de Física do ensino básico e para a realidade de seus alunos, para que os principais conceitos relacionados à Termodinâmica possam ser trabalhados de maneira adequada e atualizada do ponto de vista científico em sala de aula, em um contexto aplicado, com o uso de

um motor de combustão interna, para mostrar a aplicação e a importância da Física no desenvolvimento de tecnologia, tornando o ensino desta disciplina mais presente e atraente para a vida cotidiana dos estudantes.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, H. L., N., M. F., SANTOS, T. P., CARLOS, J. G., TANCREDO, B. O uso do experimento no ensino da física: Tendência a partir do levantamento de artigos em periódicos da área no Brasil. In.: VII ENEPEC-Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. Florianópolis, 2000.

BAZAROV, I. P. Thermodynamics. Translated by F. Immirzi. Pergamon Press: New York, 1964.

BERTOLDI, A.; EBLING, L. G.; AMARAL, A. G. Análise nos modelos de motores de ciclo otto. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Paraense, Umuarama, 2018.

BREITHAUPT, J. New Understanding Physics for Advanced Level. 4th. ed. Stanley Thornes Publishers Ltda, 2000.

CALLEN, H. B. Thermodynamics and an introduction to Thermostatistics. 2nd.ed. John Wiley e Sons, 1985.

CARNOT, N.-L.-S. Reflections on the motive power of heat. From the Original French of CARNOT, N.-L.-S. Accompanied by “An Account of Carnot’s Theory” by Sir William Thomson (Lord Kelvin). Edited by THURSTON, R. H. New York: JOHN WILEY & SONS. London: CHAPMAN HALL, Limited, 1897. Disponível em: <https://www3.nd.edu/~powers/ame.20231/carnot1897.pdf>. Acesso em: 09 Março 2022.

CLEMENT, J. Student's preconceptions in introductory mechanics. American Journal of Physics, v. 50, n. 1, p. 66-71, 1982.

CURTO-RISSO, P. L.; MEDINA, A.; HERNÁNDEZ, A. C. Theoretical and simulated models for an irreversible Otto cycle. Journal of Applied Physics, v. 10, n. 094911, p. 1-11, 2008.

DIAS, J. L. G. Ciclo de Otto: aplicação teórica e utilidade prática. 2009. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/cicloottoartigofinal.pdf>. Acesso em: 05 Março 2022.

ELLERMEIJER, T.; TRAN, T-B. Technology in Teaching Physics: Benefits, Challenges, and Solutions. In: Pietrocola M. (eds) Upgrading Physics Education to Meet the Needs of Society. Springer, Cham, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96163-7_3

FERNANDES, E. David Ausubel e a Aprendizagem Significativa. Revista Nova Escola, ed. 248, 2011. Disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/262/david-ausubel-e-a-aprendizagem-significativa?download=truevoltar=/conteudo/262/david-ausubel-e-a-aprendizagem-significativa?download=true>. Acesso em: 01 novembro 2021.

- FIOLHAIS, C.; TRINDADE J. Física no Computador: o Computador como uma Ferramenta no Ensino e na Aprendizagem das Ciências Físicas. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 25, n. 3, p. 259-272, 2003.
- FERREIRA, G. F. F. Uma sequência didática para o ensino de máquinas térmicas no ensino médio. 2020. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.
- HAGLUND, J.; STRÖMDAHL, H. Perspective on models in theoretical and practical traditions of knowledge: the example of Otto engine animations. International Journal of Technology and Design Education, v. 22, n. 3, p. 311-327, 2012.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. Extended 8th Edition. Wiley, 2007.
- HASSANI, S. From atoms to galaxies: A conceptual physics approach to scientific awareness. CRC Press, 2010.
- HECHT, E. Understanding energy as a subtle concept: A model for teaching and learning energy. American Journal of Physics, v. 87, n. 7, p. 495-503, May 2019.
- HECK, A.; KEDZIERSKA, E.; ELLERMEIJER, A. L. Design and implementation of an integrated computer working environment for doing mathematics and science. Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching, v. 28, n. 2, p. 147-161, 2009.
- HEYWOOD, J. B. Internal combustion engines fundamentals. McGraw-Hill, Inc. 1988.
- HOFSTEIN, A.; LUNETTA, V. N. The Laboratory in Science Education: Foundations for the Twenty-First Century. Science Education, v. 88, n. 1, p. 28-54, 2004.
- INGTHORSSON, R. D. The natural vs. The human sciences: myth, methodology and ontology. Discusiones Filosóficas, n. 22, p. 25-41, 2013.
- KNIES, G. G. Análise estatística da diferença do volume mínimo de um cilindro de um motor a combustão interna entre o modelo 3d e o produzido. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- LACEY, H. Reflections on science and technoscience. Scientiae Studia, v. 10, special issue, p. 103-28, São Paulo, 2012.
- LANNES NETO, F. S. Avaliação numérica do desempenho de um motor a combustão interna operando com combustível de alta octanagem. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.
- LUZ, M. T. Impactos da tecnociência nos saberes, na cultura da vida e saúde. Forum Sociológico [Online], 24 | 2014, posto online no dia 01 novembro 2014, consultado no 10

dezembro 2020. Disponível em: <http://journals.openedition.org/sociologico/1007>. Acesso em Março 2022.

NEUENSCHWANDER, D. E. The Applied Physics of Gasoline Engines: Part 1 and Part 2. Society of Physics Students – SPS. An organization of the American Institute of Physics, Spring 2014. Elegant Connections in Physics. Part 1 Mechanis and Thermodynamics. Disponível em: <https://www.spsnational.org/the-sps-observer/spring/2014/applied-physics-gasoline-engines-part-1>. Part 2 Electricity, Magnetism and Caring. Disponível em: <https://www.spsnational.org/the-sps-observer/summer/2014/applied-physics-gasoline-engines-part-2>. Acesso em: 30 nov. 2021.

NOGUEIRA, M. R. A. Sequência didática para abordagem da Segunda Lei da Termodinâmica no ensino Médio. 2020. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

OLIVEIRA, C. A.; ROSA, A. Mecânica de Automóveis: Motores de Combustão Interna - Álcool e Gasolina. Santa Maria, CEP SENAI Roberto Barbosa Ribas. Disponível em: http://www.escolaelectra.com.br/alumni/biblioteca/Apostila_motores_de_combustao_interna.pdf. Acesso em: 27 abril 2021.

PINHEIRO, N. A. M.; SILVEIRA, R. M. C. F.; BAZZO, W. A. Ciência, Tecnologia e Sociedade: A Relevância do Enfoque CTS para o Contexto do Ensino Médio. Ciência e Educação, v. 13, n. 1, p. 71-84, 2007.

PULKRABEK, W. W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1997.

SILVA, O. H. M.; LABURÚ, C. E., NARDI, R. Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis, v. 25, n. 3, p. 383-396, dez. 2008.

SILVA, R. Análogo mecânico para a discussão de conceitos da termodinâmica. 2020. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

TASNÁDI, A. M. Thermoacoustics as a Tool for Teaching Thermodynamics in Secondary Schools. Canadian Journal of Physics, v. 98, n. 6, p. 1-8, 2020.

VIENNOT, L. Spontaneous reasoning in elementary dynamics. European Journal of Science Education, v. 1, n. 2, p. 205-221, 1979.

YEADON, W.; QUINN, M. Thermodynamics education for energy transformation: a Stirling Engine experiment. Physics Education, v. 56, n. 6, p. 1-11, 2021.

ZHANG, S.; QIAO, S.; YU, J.; ZENG, J.; SHAN, S.; TIAN, L.; ZHANG, L.; WANG, X. Bat and pangolin coronavirus spike glycoprotein structures provide insights into SARS-CoV-2 evolution. Nature Communications, v. 12, n. 1607, p. 1-12, 2021.

ZHU, Z.; MENG, K.; MENG, G. Genomic recombination events may reveal the evolution of coronavirus and the origin of SARS-CoV-2. Scientific Reports, v. 10, n. 21617, p. 1-10, 2020.

ZIMMER, C.; CORUM, J.; WEE, S-L; KRISTOFFERSEN, M. Coronavirus Vaccine Tracker. The New York Times. Updated March 25, 2022. Disponível em: <https://www.nytimes.com/interactive/2020/science/coronavirus-vaccine-tracker.html>. Acesso em: Março, 2022.

ZOLLMAN, D.; FULLER, R. Teaching and learning physics with interactive video. Physics Today, n. 47, v. 4, p. 41-47, 1994.

ZUBAIRY, M. S. Quantum mechanics for beginners, with applications to quantum communication and quantum computing. OXFORD University Press, 2020

Apêndice

PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufisf** Sorocaba



*PREPARAÇÃO DE UM MOTOR DE QUATRO TEMPOS
REAL PARA O ENSINO DE CONCEITOS BÁSICOS DE
TERMODINÂMICA*



Mateazzo, A. S. e J. A. Souza

Sorocaba – SP
Abril de 2022

PREFÁCIO

Este produto educacional foi elaborado e desenvolvido para auxiliar o(a) professor(a) de Física do ensino médio no ensino de conceitos básicos de Termodinâmica, como movimento térmico, temperatura, calor, trabalho, energia, Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, processos reversíveis e irreversíveis, entropia, os ciclos termodinâmicos ideais de Carnot e de Otto, entre outros.

Estes tópicos foram contextualizados e trabalhados com a utilização de um motor real de combustão interna sucateado, mas adequadamente limpo e preparado para ser utilizado como material didático em sala de aula. Neste contexto, apresentamos brevemente o desenvolvimento e a evolução dos motores de combustão interna, sobre o seu funcionamento e sua importância para a sociedade.

Adicionalmente, preparamos uma sequência didática sugestiva mostrando como os tópicos de Termodinâmica podem ser trabalhados com o motor em uma linguagem acessível para o(a) professor(a) do ensino médio.

Esperamos que este produto educacional seja um material complementar utilizado, tanto pelos professores quanto pelos estudantes, para tornar o ensino de Física mais relevante e mais autêntico com relação à aplicação da ciência para a evolução e desenvolvimento de tecnologia.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
jasouza@ufscar.br

Os autores.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba (PROFIS-So)
Sorocaba, abril de 2022.

SUMÁRIO

A.1 PREPARAÇÃO DO MOTOR DE QUATRO TEMPOS.....	80
A.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	88
A.2.1 Breve histórico sobre o motor de combustão interna.....	88
A.2.2 A Termodinâmica e o Movimento Térmico	93
A.2.3 Definição de temperatura, calor, trabalho e energia.....	94
A.2.4 A Primeira Lei da Termodinâmica	97
A.2.5 Máquinas térmicas e a Segunda Lei da Termodinâmica	99
A.3 SEQUÊNCIA DIDÁTICA SUGERIDA	116
A.3.1 Atividade 1: Levantamento do conhecimento prévio dos estudantes	117
A.3.2 Atividade 2: Discussão dos conceitos de Termodinâmica com o uso do motor ...	118
A.3.3 Atividade 3: Revisão das respostas dos questionários aplicados.....	123
A.3.4 Fechamento das atividades	123

A.1 PREPARAÇÃO DO MOTOR DE QUATRO TEMPOS

Para a demonstração dos processos e conceitos básicos da Termodinâmica adquirimos um motor de quatro tempos, com um único cilindro (monocilíndro) e refrigerado a ar, que equipava um trator cortador de grama, como o apresentado na figura A.1. O motor utilizado estava danificado, não podendo mais ser reparado para voltar ao mercado. Isso mostra que o professor do ensino básico pode utilizar sucata como material de ensino. Optamos por este modelo por ser compacto e de fácil manuseio.

Para que o motor pudesse ser utilizado didaticamente em sala de aula foram necessárias algumas adequações. Para isso o motor foi desmontado, como mostrado na figura A.2.

Figura A.1 – Foto ilustrativa do trator cortador de grama equipado com o mesmo modelo de motor que utilizamos para a elaboração do nosso produto educacional.



Fonte: Trator Cortador De Grama Troy Bilt 13.5hp. Foto extraída de: <https://www.submarino.com.br/produto/1256800010>. Acesso em: 15 out. 2021.

Para evitar descartes inadequados, as peças não utilizadas foram doadas para uma empresa de reciclagem da região de Itu, São Paulo. A carcaça do motor e as peças selecionadas para a elaboração do nosso produto foram adequadamente limpas. Na figura A.3 apresentamos a carcaça do motor limpa.

Após a limpeza, fizemos um corte na parte superior do cilindro, conforme apresentado na figura A.4, para mostrar a câmara de combustão e facilitar a visualização do movimento do pistão durante a execução dos quatro tempos do motor.

Figura A.2 – Foto do motor desmontado para a realização da limpeza, seleção das peças e adequação para ser utilizado em sala de aula como material didático.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.3 – Foto da carcaça do motor desmontado após a limpeza.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fizemos também um corte na parte superior do motor, chamada de cabeçote, para que os alunos possam enxergar o movimento de abertura das válvulas durante o processo de admissão da mistura ar-combustível na câmara de combustão e da exaustão dos gases provenientes da combustão. O corte foi feito como apresentado na figura A.5.

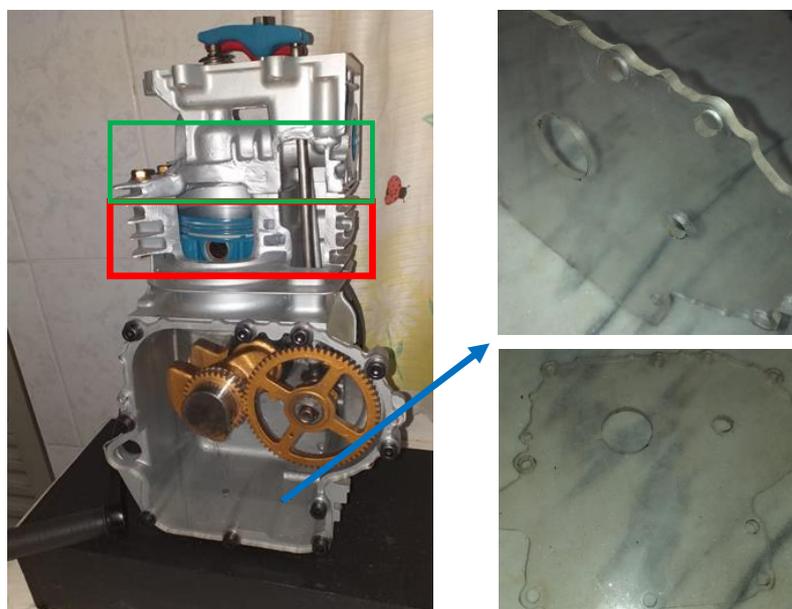
Após a limpeza e remoção de cavacos, a carcaça do motor foi pintada, primeiramente com um fundo primer, para melhorar a aderência da tinta, e em seguida com tinta automotiva na cor alumínio, para não descaracterizar a aparência metálica da carcaça do motor.

Figura A.4 – Foto mostrando uma parte do motor antes e depois do corte transversal feito na região superior do cilindro para facilitar a visualização do movimento do pistão do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.5 – Foto da tampa de acrílico, à direita, confeccionada para tornar o interior da câmara de óleo do motor visível, conforme mostrado na foto à esquerda. Nesta parte encontram-se a maior parte dos componentes móveis do motor. O quadro vermelho mostra o corte feito na parte superior do cilindro, como mostrado na figura A.4. Este corte é estendido à região do cabeçote, quadro verde, para facilitar a visualização da abertura das válvulas de admissão e exaustão do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tampa de alumínio que faz o fechamento da parte inferior do motor foi substituída por uma tampa transparente de acrílico, como a mostrada na figura A.5. Este procedimento foi realizado para permitir que os alunos observassem a transformação do movimento linear do

pistão no movimento circular do virabrequim, a partir da conversão de energia térmica em mecânica. Através desta tampa pode-se apresentar também o movimento do comando de válvulas, responsável pela abertura e fechamento das válvulas de maneira sincronizada para que o motor funcione de forma precisa. Na figura A.5 mostramos que o corte feito na parte superior do cilindro (figura A.4), destacado pelo quadro vermelho, foi estendido para a região do cabeçote, logo acima do cilindro, para que os alunos possam enxergar o movimento de abertura das válvulas durante o processo de admissão da mistura ar-combustível na câmara de combustão e da exaustão dos gases provenientes da combustão.

Optamos por pintar alguns dos componentes internos do motor (figura A.6) com cores diferentes para facilitar a identificação, a diferenciação e a visualização dos mesmos durante seus movimentos. Dentre eles estão o *virabrequim*, também chamado de árvore de manivelas, responsável pela conversão do movimento de sobe e desce do pistão em movimento de rotação, o *comando de válvulas*, utilizado para acionar as válvulas de admissão e escape através das varetas que são conectadas aos *balancins* e o *pistão*, ou êmbolo, que recebe a expansão dos gases provenientes da explosão da mistura ar-combustível. O movimento do pistão é transmitido ao virabrequim pela *biela*, que é presa ao pistão através do *pino*.

Figura A.6 – Foto das peças do motor pintadas em cores diferentes para facilitar a identificação e a visualização das mesmas durante o funcionamento do motor.

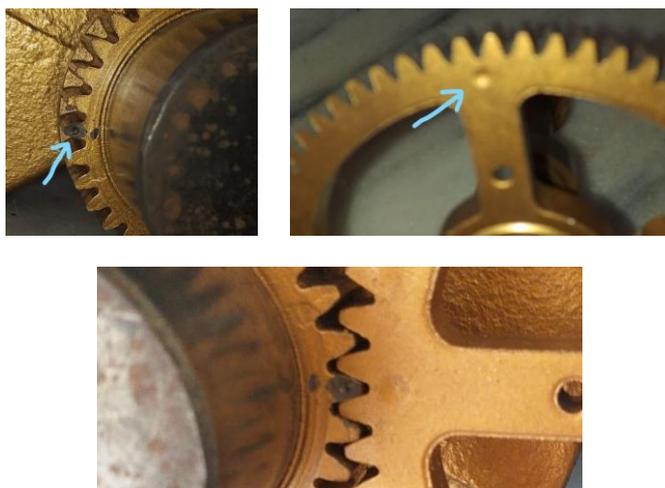


Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos estes componentes são colocados em movimento durante o funcionamento do motor. Os balacins foram pintados especialmente nas cores azul e vermelho para fornecer uma representação visual das temperaturas menores e maiores, respectivamente, observadas no ciclo de trabalho do motor. Isso será discutido com maiores detalhes mais adiante.

Após o preparo dos componentes, o processo de montagem do motor pode ser iniciado. Uma observação muito importante que deve ser feita é que, não basta apenas colocar cada componente em seu devido lugar, é necessário fazer a sincronização do sistema observando o ponto que vem gravado de fábrica tanto na engrenagem do comando de válvulas, quanto na engrenagem do virabrequim, como mostrado na figura A.7. Dessa forma é possível movimentar os componentes do motor da mesma maneira que é observado no funcionamento real do mesmo.

Figura A.7 – Fotos mostrando as marcações de fábrica das peças do motor para facilitar a sincronização do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para dar sustentação ao motor e facilitar o manuseio do dispositivo durante o seu funcionamento foi confeccionada uma base de madeira. Para realizar o giro do motor e demonstrar os processos termodinâmicos durante o seu funcionamento, adaptamos uma manivela no eixo do virabrequim, construída por nós mesmos a partir de materiais recicláveis, conforme foto apresentada na figura A.8 à esquerda.

A alavanca da manivela foi feita com um pedivela de bicicleta e a empunhadura com uma manopla, também de bicicleta. Esta foi fixada à alavanca por um parafuso.

Para fazer o acoplamento da manivela no eixo do virabrequim utilizamos uma chave de catraca quebrada e a soldamos na cabeça de um parafuso de fixação, como mostrado na figura

A.8 à direita. Este parafuso fixa o volante contra peso situado na parte de trás do motor, como apresentado na figura A.9. O volante contra peso é o que auxilia o motor no momento do giro, garantindo a inércia do movimento do pistão. Durante a demonstração em sala de aula foi feita uma comparação do giro do motor com e sem o volante para que os alunos entendessem a diferença. Na figura A.10 apresentamos diferentes ângulos do motor completamente montado, pronto para ser utilizado em uma sala de aula convencional ou em laboratórios apropriados para demonstrações experimentais.

Figura A.8 – À esquerda apresentamos uma imagem da manivela construída a partir de materiais reciclados e utilizada para facilitar a movimentação do motor durante as aulas. À direita é apresentado o parafuso utilizado para a fixação da manivela composto por uma chave de catraca quebrada (seta) soldada a um parafuso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.9 – Volante contra peso acoplado na parte de trás do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para simular a ignição da mistura ar-combustível com a vela na câmara de combustão nós adaptamos uma lâmpada de LED na carcaça de uma vela de ignição. A lâmpada é acionada através de um circuito elétrico simples com um sensor de fim de curso do tipo toque, como mostrado na figura A.11. A lâmpada é acionada quando o pistão sobe no cilindro, que é o momento em que a mistura ar-combustível é comprimida para a realização da combustão.

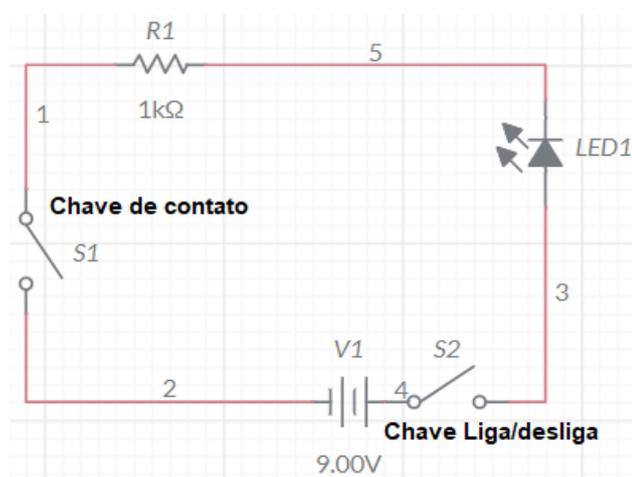
O motor que acabamos de apresentar é o principal componente do nosso produto educacional. Adicionalmente a esta montagem, preparamos uma sequência didática para mostrar como conceitos básicos de Termodinâmica, como temperatura, calor, trabalho, energia, entre outros, podem ser abordados a partir da utilização do motor de combustão interna. Estes conceitos são descritos na próxima seção.

Figura A.10 – Fotos em diferentes ângulos do motor pronto para ser utilizado como material didático.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.11 – Fotos mostrando uma lâmpada de LED adaptada na carcaça de uma vela de ignição (superior esquerda) e o correspondente circuito elétrico acoplado ao motor (superior direita) utilizado para acionar a mesma e simular a ignição da mistura ar-combustível na câmara de combustão no momento em que o pistão comprime a mistura no cilindro. Abaixo mostramos a malha do circuito elétrico e os valores dos componentes utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção abordamos de maneira sugestiva os conceitos básicos de Termodinâmica que podem ser tratados e discutidos com a utilização do motor de combustão interna. Apresentamos também um breve histórico deste motor, o impacto que os mesmos trouxeram para a sociedade, sua funcionalidade e um pouco sobre os seus componentes, tendo como base de explicação o motor utilizado.

A.2.1 Breve histórico sobre o motor de combustão interna

Um motor de combustão interna é uma máquina térmica que converte a energia química de um combustível, como álcool, gasolina, diesel, entre outros, em energia mecânica. Nestes motores a energia química é primeiramente convertida em energia térmica através da combustão da mistura ar-combustível no interior do sistema mecânico do motor. Em um motor de combustão externa, como um motor Stirling ou uma máquina a vapor, esse processo ocorre fora do motor. As substâncias ou fluidos de trabalho em um motor de combustão interna, responsáveis pela movimentação das partes mecânicas do motor, são a mistura ar-combustível, antes da combustão, e os gases provenientes da combustão. A conversão da energia térmica em energia mecânica é feita usualmente através de um eixo de rotação (HEWOOD, 1988).

Estes motores são usualmente utilizados em veículos de transportes como carros, caminhões, motocicletas e alguns aviões, na realização de serviços pesados como em tratores para trabalhos agrícolas e para a construção civil, em máquinas de pavimentação asfáltica, como motores estacionários para acionar geradores e bombas e motores menores portáteis para a realização de trabalhos mais leves como sopradores de ar, motosserras, cortadores de grama, etc.

A maioria dos motores de combustão interna são motores recíprocos, ou mais usualmente conhecidos como motores de pistão. Estes são caracterizados por pistões que se movem para frente e para trás ou para cima e para baixo em cilindros no interior do motor. Motores recíprocos podem ter um cilindro ou vários, até 20 ou mais, e estes podem ser dispostos em diferentes configurações geométricas. Além disso, estes motores podem ser manufacturados de diferentes formas com relação ao seu tamanho, geometria, estilo e características operacionais (PULKRABEK, 1997).

O motor de combustão interna tornou-se uma realidade prática na segunda metade do século XIX, com a invenção de Jean J. E. Lenoir (1822-1900) em 1860, coincidindo com o desenvolvimento do automóvel. Nicolaus A. Otto (1832-1891) e Eugen Langen (1833-1895) foram dois dos principais inventores da época, introduzindo o motor Otto-Langen, com maior eficiência, em 1867. Neste período, motores operando com o mesmo ciclo de quatro tempos dos motores dos automóveis modernos começaram a evoluir como o melhor modelo. Otto recebeu grande credibilidade quando seu protótipo de motor de quatro tempos foi construído em 1876, por ter reduzido significativamente o peso e o volume do motor (HEWOOD, 1988; PULKRABEK, 1997).

Em 1880 o motor de combustão interna foi utilizado pela primeira vez em automóveis. Na mesma década os motores de dois tempos tornaram-se práticos e foram manufaturados em larga escala. Em 1892, Rudolf Diesel (1858-1913) aperfeiçoou seu motor de ignição por compressão para o mesmo modelo de motor diesel que conhecemos hoje. Antes disso, estes motores eram grandes, lentos, ruidosos e possuíam apenas um cilindro, apesar de serem geralmente mais eficientes que os motores de ignição por centelha. Demorou até a década de 1920 para que motores de ignição por compressão multicilindros fossem construídos em um tamanho menor o suficiente para serem utilizados em automóveis e caminhões (HEWOOD, 1988; PULKRABEK, 1997).

Além da grande quantidade de experimentos e desenvolvimento na Europa e Estados Unidos na segunda metade do século XIX, dois outros empreendimentos tecnológicos ocorreram naquela época para estimular o surgimento do motor de combustão interna. Em 1859 o petróleo bruto foi descoberto na Pensilvânia, fazendo com que combustíveis melhores fossem desenvolvidos para serem utilizados nestes motores. Até então, a falta de bons combustíveis era uma grande desvantagem para o desenvolvimento dos motores. Os combustíveis da época como óleo de baleia, óleos minerais, carvão, pólvora, entre outros, não eram bons o suficiente para os motores em desenvolvimento. Demorou muitos anos até a indústria do petróleo evoluir do petróleo bruto para óleos lubrificantes e a gasolina, que é um dos principais combustíveis utilizados nos automóveis modernos (PULKRABEK, 1997).

O segundo empreendimento tecnológico que estimulou o desenvolvimento do motor de combustão interna foi a invenção do pneu de borracha, ou pneumático, por John B. Dunlop (1840-1921), que foi quem introduziu o mesmo no mercado pela primeira vez em 1888. Esta invenção tornou o automóvel muito mais rápido e desejável, gerando um grande mercado para sistemas de propulsão, incluindo o motor de combustão interna (PULKRABEK, 1997).

Quando o automóvel surgiu, o motor de combustão interna competiu com motores elétricos e a vapor, como meio básico de propulsão. Já no início do século XX os motores elétricos e a vapor desapareceram dos automóveis, devido à baixa eficiência dos motores elétricos e ao longo tempo necessário para ativar ou inicializar o motor a vapor (PULKRABEK, 1997). Dessa forma, o século XX foi o período de prosperidade do motor de combustão interna, tanto para o automóvel quanto para outras aplicações. Contudo, com o desenvolvimento de tecnologia ao longo do século XX, caracterizado pela descoberta de novos materiais e processos para a fabricação de baterias mais duráveis, por exemplo, e a necessidade de utilização de combustíveis menos poluentes para minimizar os efeitos do aquecimento global e melhorar a qualidade de vida das pessoas e dos demais seres da natureza, mais atenção tem sido dada ao motor elétrico e ao desenvolvimento de novas fontes de energia para a propulsão de automóveis e outras aplicações.

A.2.1.1 Classificação dos motores de combustão interna

Os motores de combustão interna podem ser classificados de diferentes formas de acordo com o tipo de ignição, o ciclo do motor (tempos) ou ciclo de trabalho, a localização das válvulas, o modelo ou design básico, a posição e o número dos cilindros, ao tipo de combustível utilizado, entre outros (HEWOOD, 1988; PULKRABEK, 1997). Nós descrevemos a classificação do motor que utilizamos neste trabalho de acordo com algumas destas características e comentamos brevemente algumas diferenças que existem em outros motores. Nosso objetivo nesta seção é fornecer uma visão geral e familiarizar o leitor com a terminologia específica dos componentes e processos que ocorrem em um motor de combustão interna. Maiores detalhes através de fotos, ilustrações e diagramas são fornecidos mais adiante, durante a exposição dos conceitos físicos envolvidos para melhorar o entendimento de tais processos.

Nosso motor é um motor de combustão interna de *ignição por centelha*. A centelha é produzida por um dispositivo elétrico, chamado de vela de ignição, através de uma descarga elétrica causada por uma alta voltagem imposta entre os dois eletrodos da vela. Como estes eletrodos são localizados no interior da câmara de combustão, a centelha provoca a explosão da mistura ar-combustível empurrando o pistão e gerando movimento no eixo do motor. Existem também os motores de *ignição por compressão*. Nestes a mistura ar-combustível explode devido ao aumento de temperatura provocado pela alta compressão dos mesmos na câmara de combustão. Este processo é utilizado usualmente nos motores a diesel, comuns em ônibus, caminhões, caminhonetes, tratores, trens e navios no Brasil e também em vários carros populares na Europa.

O motor que utilizamos é um motor cujo ciclo de trabalho é de *quatro tempos*. Um ciclo de quatro tempos é caracterizado por quatro movimentos do pistão durante duas rotações do eixo do motor (virabrequim). Em cada movimento ou tempo do pistão tem-se um processo termodinâmico específico. Estes serão discutidos em maiores detalhes mais adiante, quando os conceitos de Física forem abordados. Outra característica importante no ciclo de trabalho do motor que utilizamos é que ele é naturalmente aspirado. Isso significa que a mistura ar-combustível é aspirada, sugada, para dentro da câmara de combustão pelo movimento descendente do pistão, que cria uma diferença de pressão entre a câmara e a atmosfera na vizinhança do motor. Em alguns motores a mistura é injetada através de um compressor ou uma turbina. Outro tipo de motor é o de ciclo de *dois tempos*, caracterizado por dois movimentos do pistão durante uma rotação do virabrequim. Estes motores, por serem mais leves e compactos, eram usualmente utilizados em motos e mobiletes, sendo ainda muito versáteis em diversas aplicações como em karts, cortadores de grama, sopradores de ar, motosserras, jet skis, entre outros. Por serem altamente poluentes, devido à necessidade de misturar óleo no combustível, os motores de dois tempos se tornaram inviáveis para aplicações em motos, automóveis e veículos pesados, como no caso do trator cortador de grama equipado com o motor de quatro tempos que utilizamos.

As *válvulas de admissão e escape* do motor que utilizamos estão localizadas na *cabeça do motor*, comumente chamada de *cabeçote*. A cabeça do motor é a parte superior da câmara de combustão. Além das válvulas, a vela de ignição também está localizada no cabeçote. Em alguns motores as válvulas estão localizadas no *bloco* do motor, que é o componente central do mesmo. Na região do cabeçote e do cilindro pode-se observar também várias aletas metálicas na forma de cunha. Estas aletas compõem o sistema de refrigeração do nosso motor para manter a temperatura ideal de funcionamento do mesmo através da circulação do ar em torno de sua carcaça. Isso faz com que nosso motor seja refrigerado a ar.

O design básico do nosso motor é do tipo *recíproco*, também conhecido como motor de *pistão*. Este é caracterizado pelo movimento de sobe e desce do pistão no cilindro e a câmara de combustão é localizada na parte fechada do cilindro. O motor utilizado também é caracterizado por ser um motor de um *único cilindro* e um *único pistão* conectado ao virabrequim. A posição e o número de cilindros pode variar nos motores de combustão interna, sendo classificados de acordo com a configuração dos mesmos, como o *motor em linha*, em que os cilindros são posicionados em linha reta um atrás do outro, o *motor V* com duas fileiras de cilindros conectadas a um único virabrequim formando um ângulo entre si que pode variar de 15 a 120°, entre outros (PULKRABEK, 1997). Os motores em linha com quatro cilindros

são muito comuns em automóveis e outras aplicações. A nomenclatura de um motor do tipo V vem acompanhado de um número para indicar o número de cilindros que o mesmo possui. Um dos mais utilizados no Brasil é o motor V6, caracterizado por duas fileiras com três cilindros cada e equipa veículos maiores como picapes, vans e veículos utilitários esportivos (SUV – *Sport Utility Vehicle*).

Por fim, o *ciclo de trabalho* do nosso motor pode ser aproximado pelo ciclo de Otto, e utiliza gasolina como combustível. Os combustíveis utilizados neste tipo de motor possui baixa volatilidade, como a gasolina e o álcool. Os motores em que é utilizado óleo diesel como combustível funcionam com *ciclo de trabalho de Diesel*.

Na figura A.12 apresentamos uma foto do motor utilizado e cada parte do mesmo, conforme apresentado nesta seção.

Figura A.12 – Fotos mostrando as partes do motor de combustão interna utilizado neste trabalho, conforme a terminologia apresentada nesta seção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas próximas seções apresentamos os conceitos básicos de Termodinâmica que podem ser abordados em sala de aula para discutir sobre o funcionamento do motor de quatro tempos utilizado e o ciclo de trabalho de Otto correspondente. Ao final de cada seção apresentamos uma sugestão de abordagem dos tópicos correspondentes com a utilização do motor para facilitar o trabalho do professor.

A.2.2 A Termodinâmica e o Movimento Térmico

A Física se ocupa do estudo de diferentes formas de movimento. Na Termodinâmica são analisados fenômenos causados pela ação combinada de um número muito grande de moléculas ou outras partículas se movendo continuamente de maneira desordenada. Todos os corpos que estão a nossa volta são compostos por pequenas partículas e várias de suas propriedades físicas tem origem neste movimento coletivo desordenado. Ou seja, a ação coletiva das partículas fornece novas qualidades para o sistema que as mesmas compõem. A este movimento é dado o nome de *movimento térmico*. Apesar do nome térmico, isso não significa que estudamos apenas fenômenos térmicos com a Termodinâmica. Estudamos também fenômenos elétricos, magnéticos, quânticos, entre outros. Mas os estudos destes fenômenos são conduzidos a partir do ponto de vista das propriedades específicas do movimento térmico em cada um deles. Os principais conteúdos da Termodinâmica consistem em analisar as leis do movimento térmico em sistemas que estão em equilíbrio e na passagem de sistemas para o estado de equilíbrio (BAZAROV, 1964).

Quando dizemos que um sistema está em equilíbrio termodinâmico, significa que o mesmo está em equilíbrio térmico, químico e mecânico. O equilíbrio térmico é estabelecido quando a temperatura do sistema fica constante. Já o equilíbrio químico é caracterizado quando a estequiometria do sistema é mantida constante ou quando existe uma reação química reversível, de maneira que a quantidade de reagentes e produtos da reação são mantidos em concentrações que não variam com o tempo. O equilíbrio mecânico é observado quando não existem deformações mecânicas no sistema.

Durante o funcionamento de um motor é muito difícil estabelecer o equilíbrio termodinâmico no sistema, pois a temperatura no motor está sempre variando, o que provoca variações nas dilatações térmicas dos componentes do motor. O equilíbrio químico no sistema é comprometido pela queima do combustível, que é uma reação química irreversível. Contudo, podemos considerar em boa aproximação os processos termodinâmicos envolvidos no funcionamento do motor como processos de equilíbrio, pois estes ocorrem em curtos intervalos de tempo. Só para termos uma noção da velocidade destes processos, a velocidade do motor de um carro popular, medida através das rotações do virabrequim por minuto (rpm), pode ultrapassar 5.000 rpm. Isso equivale a mais de 80 rotações por segundo. Como já discutido, para um motor de *quatro tempos*, como o que utilizamos, um ciclo é caracterizado por quatro movimentos do pistão durante duas rotações do virabrequim. Isso significa que um ciclo termodinâmico completo pode durar menos de 0,02 segundo neste caso. Em carros de fórmula

1, a velocidade do motor é próxima de 20.000 rpm, o que equivale a um ciclo termodinâmico completo da ordem de 10^{-3} segundo de duração. O motor que utilizamos pode chegar até 1.300 rpm, o que fornece um ciclo termodinâmico de aproximadamente 0,09 segundo, ou seja, da ordem de 10^{-2} segundo. O tempo para o estabelecimento de um único processo termodinâmico é ainda menor, pois um ciclo termodinâmico possui pelo menos quatro processos. Forneceremos maiores detalhes sobre isso quando discutirmos ciclos termodinâmicos.

Na Termodinâmica, o estudo de propriedades gerais de sistemas físicos em equilíbrio é conduzido a partir de duas leis básicas, chamadas de leis da Termodinâmica, junto com uma variedade de resultados experimentais. Nesta ciência não é considerado explicitamente as noções da estrutura molecular de um sistema. Isso significa que, apesar de todas as propriedades termodinâmicas de sistemas físicos serem provenientes do movimento térmico nos mesmos, a Termodinâmica nos permite estabelecer muitas destas propriedades sem a necessidade de considerar a estrutura molecular dos corpos. Portanto, na análise do funcionamento do motor de quatro tempos, nós não levamos em conta explicitamente a noção de átomos e suas interações para entender todos os conceitos físicos envolvidos.

Sugestão de abordagem: para iniciar as discussões sobre os tópicos propostos o professor pode introduzir a Termodinâmica através de uma descrição histórica, como a importância das máquinas a vapor na Revolução Industrial ou sobre os avanços da termometria, como descrito usualmente nos livros didáticos do ensino básico. Na nossa abordagem preferimos introduzir o movimento térmico e a sua importância para o estudo dos fenômenos termodinâmicos e para a definição de temperatura, como a medida da intensidade deste movimento. Apesar de sua importância, quase nenhuma atenção é dada a esse tipo de movimento nos livros didáticos do ensino básico. O uso do motor para a discussão sobre equilíbrio termodinâmico é imprescindível, pois é necessário fornecer uma ideia do que é um processo de equilíbrio nos processos termodinâmicos envolvidos no funcionamento do motor, uma vez que estes ocorrem em curtos intervalos de tempo. Para isso recomendamos a utilização dos exemplos fornecidos nesta seção ou similares.

A.2.3 Definição de temperatura, calor, trabalho e energia

Quando um carro é ligado é possível notar um aquecimento no capô do mesmo rapidamente, pois abaixo do capô é a região onde encontra-se os motores da maioria dos automóveis. Mas qual é o processo físico responsável por este aquecimento e qual o parâmetro termodinâmico mais adequado para quantificar este aumento de energia?

O aquecimento de qualquer objeto só é possível através de mecanismos de transmissão de energia. A energia é a capacidade da matéria interagir com a matéria para efetuar mudanças físicas (HECHT, 2019) e é classificada de diferentes formas como energia cinética, de repouso, interna, nuclear, entre outras, de acordo com os parâmetros que estão sendo analisados. O aquecimento do motor do carro caracteriza uma mudança física daquele sistema. Estas mudanças são adequadamente monitoradas através da medida da alteração de diferentes parâmetros do sistema, como o seu volume, pressão, temperatura e vários outros.

O parâmetro responsável por monitorar o aquecimento ou o resfriamento de um objeto é a temperatura. Formalmente, a temperatura termodinâmica é um parâmetro interno do sistema, definido no equilíbrio como uma medida da intensidade do movimento térmico do mesmo (BAZAROV, 1964). Ou de maneira mais simples, a temperatura está diretamente relacionada com a agitação das partículas constituintes do sistema. Quanto maior a agitação das mesmas, maior será a temperatura do sistema. A importância da temperatura reside no fato desta propriedade nos permitir determinar se um objeto está em equilíbrio térmico com outros. Sua definição é uma consequência direta de observações experimentais que culminaram no que chamamos hoje de lei zero da Termodinâmica. Esta estabelece que se dois objetos A e B, isolados termicamente um do outro, estão em contato e em equilíbrio térmico com um terceiro objeto C, então os objetos A e B estão em equilíbrio térmico entre si (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Como já discutido, se dois ou mais objetos estão em equilíbrio térmico, eles possuem a mesma temperatura.

A temperatura medida por um termômetro é chamada de temperatura empírica, pois sua aferição depende da substância termométrica utilizada na construção do termômetro. Esta é representada usualmente pela letra θ e pode ser aferida em diferentes escalas, sendo a escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ou centígrada, a mais conhecida e utilizada no Brasil. Esta escala é definida em relação ao ponto de congelamento 0°C e o de ebulição 100°C da água à pressão de 1 atm.

A escala termodinâmica de temperatura, usualmente conhecida como *escala absoluta*, é representada pela letra T e não depende da substância termométrica. Esta é definida em relação a dois pontos fixos: o *zero absoluto*, que é o limite inferior, inatingível, para a temperatura de qualquer corpo e o *ponto triplo da água*, que é a temperatura em que há a coexistência entre gelo, água e vapor de água em equilíbrio térmico. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a temperatura absoluta é medida em kelvin (K) de maneira que o zero absoluto é dado por $0 K$ e para o ponto triplo da água é definido o valor de $273,16 K$. A conversão da temperatura empírica medida em graus celsius $\theta(^{\circ}\text{C})$ para a temperatura absoluta medida em kelvin $T(K)$ é descrita pela relação $T = \theta + 273,15$. Uma vez que o ponto triplo da água é observado em $\theta = 0,01^{\circ}\text{C}$,

este é aferido na escala absoluta de temperatura por $T = 273,16 K$ (BREITHAUPT, 2000; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). A temperatura que utilizamos ao longo deste trabalho para os cálculos e discussão dos conceitos termodinâmicos é a temperatura absoluta, representada pela letra T . Para os valores de temperatura observados no funcionamento de um motor de combustão interna real, utilizamos a temperatura empírica em graus celsius θ .

O tipo de energia associado com a temperatura é a energia interna, comumente chamada de energia térmica. Esta é toda a energia associada com as partículas constituintes do sistema, como átomos e moléculas, incluindo seus movimentos de translação, rotação, vibração e a interação entre estas partículas.

Mas como podemos fazer variar a temperatura de um objeto? Por que observamos o aquecimento do capô do carro uma vez que o motor deste não está em contato direto com o mesmo?

Como já discutido, para que mudanças físicas sejam observadas em um sistema é necessário que o mesmo ganhe ou perca energia. Para isso é necessário mecanismos de transferência de energia, como o calor e o trabalho. O calor é o método pelo qual energia é transferida de um corpo para outro devido a uma diferença de temperatura entre os mesmos (BAZAROV, 1964; CALLEN, 1985; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Para que energia seja transferida através de calor é necessário estabelecer contato térmico entre os dois sistemas envolvidos. Mesmo que dois objetos não estejam em contato físico entre si, o contato térmico pode ser estabelecido através de outra substância, como o ar, por exemplo.

Por ser um método ou mecanismo de transferência de energia, o calor não compõe uma propriedade do sistema. Este está relacionado ao processo de levar um sistema de um estado para outro apenas e não ao estado de equilíbrio do mesmo. Em muitos livros didáticos encontramos definições incorretas para o calor como sendo “*energia em trânsito*” ou que “*calor é uma forma de energia*”, ou ainda tratando o calor como uma substância que pode ser transferida de um corpo para outro em expressões como “*transferência de calor de um corpo para outro*” ou “*métodos de transmissão de calor*” (SILVA; LABURÚ; NARDI 2008; SILVA, 2020). O que é transferido entre dois sistemas quando existe uma diferença de temperatura entre eles é energia e não calor. O calor é o processo ou método pelo qual energia flui espontaneamente do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura.

O trabalho é outro método de transmissão de energia de um sistema para outro através da ação de uma força em uma determinada distância (HECHT, 2019). Assim como o calor, o trabalho está relacionado a um processo. É possível também aumentar a temperatura de um sistema através de trabalho, bastando passar o dedo em uma superfície, por exemplo. A força

de atrito entre nosso dedo e a superfície, faz com que ambos aumentem sua temperatura. O atrito é o responsável pela necessidade de lubrificação das peças do sistema mecânico de um motor. Caso isso não seja feito, o aumento de temperatura entre as peças pode ser tão grande, que pode ocorrer a fusão das partes, fazendo com que uma peça grude na outra comprometendo seriamente as peças e o funcionamento do motor. Outro exemplo de como aumentar a temperatura de um sistema através de trabalho é a compressão de um gás. Este processo é amplamente explorado no funcionamento de um motor de combustão interna.

Quando um determinado sistema atinge um estado de equilíbrio, não faz mais sentido falarmos em trabalho ou calor e muito menos em medir trabalho ou calor, pois estes não compõem propriedades físicas do sistema.

Sugestão de abordagem: no motor de quatro tempos que utilizamos, estes conceitos estão sempre presentes. O professor pode falar de temperatura, por exemplo, na discussão sobre o aquecimento de toda a carcaça do motor, sobre a diferença de temperatura entre suas partes, no sistema de arrefecimento, entre outros. As variações de temperatura no motor caracterizam a existência de energia fluindo no sistema devido à interação entre suas partes e a ilustração do seu conceito, dado pela capacidade da matéria interagir com a matéria para efetuar mudanças físicas. Tais variações também podem ser exploradas para discutir de maneira introdutória o que é um processo termodinâmico, o estado termodinâmico de um sistema e como o mesmo pode ser levado de um estado de equilíbrio para outro. O calor pode ser discutido nos processos de aquecimento ou resfriamento do sistema e o trabalho no movimento de sobe e desce do pistão, causado pela força aplicada pela explosão da mistura ar-combustível. Energia é transferida do pistão para o virabrequim através de trabalho por intermédio da biela, fazendo com que o mesmo gire e conseqüentemente faça o automóvel entrar em movimento através do sistema de transmissão, composto por um conjunto de engrenagens, polias e eixos, responsáveis por transmitir a energia do motor para as rodas do carro através de trabalho.

A.2.4 A Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica é a generalização do princípio de conservação de energia e foca, usualmente, nos graus de liberdade internos do sistema, descritos pelo conceito de energia interna U , e nos processos de transmissão de energia, dados por calor e trabalho.

Matematicamente, a Primeira Lei é descrita por:

$$\Delta U = Q - W, \quad (A.1)$$

sendo $Q > 0$ a energia que o sistema adquire através de calor e $W > 0$ a energia que o sistema fornece à vizinhança através de trabalho.

Dessa forma, a equação (A.1) descreve sistemas em que mudanças na energia interna são provocadas pela transferência de energia através de calor ou trabalho. De maneira mais simplificada, podemos dizer que a Primeira Lei estabelece que um sistema pode ser aquecido ou resfriado (variação de U) pela transferência de energia do sistema para a vizinhança ou da vizinhança para o sistema através de calor ou trabalho.

Uma confusão muito comum entre os estudantes sobre a descrição matemática da Primeira Lei, dada pela equação (A.1), é achar que Q e W são medidas de calor e trabalho. Apesar desses parâmetros serem nomeados nos livros didáticos de maneira inadequada de quantidade de calor e trabalho, respectivamente, estes não representam tais medidas, mas sim, as quantidades de energia que o sistema adquire ou perde através dos métodos calor e trabalho, respectivamente. É por isso que Q e W são descritos em unidades de energia, o joule (J), pois são quantidades de energia.

A equação (A.1) tem uma consequência direta em processos cíclicos, que são aqueles em que o estado inicial do sistema coincide com o seu estado final. Estes processos são característicos em motores de combustão interna, como o que utilizamos. Basta analisarmos o movimento do pistão e veremos que o sistema é levado ao mesmo estado inicial após algumas etapas. Isso ficará mais claro quando discutirmos ciclos termodinâmicos. Dessa forma, se o estado inicial do sistema for caracterizado pela energia interna U_1 e o estado final por U_2 , em um processo cíclico teremos $U_1 = U_2$, de maneira que $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$. Pela equação (A.1) obtemos $Q = W$. Este resultado mostra que para termos energia transferida do motor para as rodas de um veículo através de trabalho é necessário que energia seja adquirida pelo motor através de calor, ou seja, só é possível fazer um motor térmico funcionar se tivermos uma fonte térmica de energia. Esta é fornecida pela queima do combustível. Sem combustível um carro, por exemplo, não pode ser colocado em movimento. Na Termodinâmica esse resultado nos diz que é impossível conceber um *moto perpétuo de primeira espécie*, ou seja, podemos dizer de maneira geral que é impossível um motor criar energia, ele apenas converte uma modalidade de energia em outra. No caso do motor de combustão interna, temos energia química do combustível sendo convertida em energia térmica e finalmente em energia mecânica.

Para saber mais sobre a Primeira Lei da Termodinâmica e suas consequências veja a referência (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007).

Sugestão de abordagem: para que a discussão sobre a Primeira Lei da Termodinâmica, ou o princípio de conservação de energia, fique bem fundamentada é imprescindível que esta

seja feita logo após a definição de calor, trabalho e energia, discutidos na sugestão de abordagem da seção anterior. Tal importância reside no fato deste princípio relacionar matematicamente a modalidade de energia, dada pela energia interna U , com os métodos de transmissão de energia, calor e trabalho. O professor não irá falar sobre diferenciais exatas e inexatas no ensino médio, mas ele pode apresentar a equação de maneira mais simplificada, $\Delta U = Q - W$, a qual pode ser reescrita como $Q = \Delta U + W$. Quando escrita dessa forma, o princípio de conservação torna-se mais visível matematicamente, pois a energia total adquirida pelo motor através de calor Q pela queima do combustível, será convertida em energia mecânica através de trabalho W , traduzida no movimento mecânico do pistão, e na variação da energia interna ΔU de todo o sistema, identificada pelo aquecimento do mesmo. É interessante também o professor falar sobre a variação da energia interna em um processo cíclico, em que $\Delta U = 0$ e conseqüentemente $Q = W$, para explicar a necessidade de uma fonte de energia para a conversão de uma modalidade de energia em outra através de trabalho, ou termos usuais, para a realização de trabalho. Isso é importante para discutir sobre a impossibilidade de geração de energia por um motor ou sua autossustentabilidade, de maneira que este dispositivo só pode converter uma modalidade de energia em outra.

A.2.5 Máquinas térmicas e a Segunda Lei da Termodinâmica

Um motor é uma máquina desenvolvida para converter uma ou mais formas de energia, como energia elétrica, térmica, química, nuclear, entre outras, em energia mecânica. Uma máquina térmica é um motor que opera ciclicamente para converter energia térmica em energia mecânica. Um motor de combustão interna, como o que utilizamos, é uma máquina térmica que utiliza a energia térmica da queima do combustível, transferida ao pistão através de trabalho, e a energia mecânica resultante faz com que o veículo se movimente.

A Segunda Lei da Termodinâmica foi descoberta durante os estudos conduzidos para otimizar a eficiência de máquinas térmicas. O primeiro trabalho teórico formal relacionado é devido à Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), publicado em 1824 e intitulado “*Reflexões sobre a força eletromotriz do calor*” (CARNOT, 1897). Assim como a Primeira Lei, a Segunda Lei da Termodinâmica é uma generalização de resultados obtidos experimentalmente. Além de estabelecer as condições para a obtenção da eficiência máxima de máquinas térmicas, a Segunda Lei estabelece a existência de um parâmetro de estado chamado de *entropia*. Estes conceitos são discutidos em detalhes nas próximas seções.

A.2.5.1 Ciclo de Carnot e a eficiência de máquinas térmicas

Um objeto ou uma substância usualmente sofre mudanças em sua temperatura quando energia é transferida da vizinhança para o sistema ou do sistema para a sua vizinhança, como no exemplo do aquecimento do capô do carro. Contudo, existem situações em que tal transferência de energia não acarreta em mudanças na temperatura do sistema. Exemplos disso é a fusão do gelo, caracterizada por uma transição de estado físico da água de sólido para líquido, ou um processo termodinâmico isotérmico, que pode ser concebido por uma expansão ou compressão volumétrica, mantendo-se a temperatura do sistema constante.

Em todo sistema termodinâmico, seja este simples ou complexo, três processos são sempre possíveis: *processo isotérmico*, que ocorre à temperatura T constante, *processo adiabático*, em que não há trocas de energia através de calor entre o sistema e a vizinhança $Q = 0$, e o *processo politrópico*, que ocorre quando a capacidade térmica do sistema C é mantida constante (BAZAROV, 1964). A mistura ar-combustível presente na câmara de combustão do motor de quatro tempos é um exemplo de sistema termodinâmico sujeito a processos como estes.

O número e as características de outros processos possíveis dependem da natureza do sistema. Em sistemas mais complexos, um número maior de diferentes processos é possível. Como a mistura ar-combustível é um gás, esta pode ser considerada como um sistema termodinâmico simples do tipo (P, V, T) , sendo P a pressão e V o volume do gás. Neste caso, mais dois processos termodinâmicos podem ser concebidos: *processo isovolumétrico* ou *isocórico*, que ocorre quando o volume da mistura V é mantido constante e o *processo isobárico*, quando a pressão P da mistura é mantida constante.

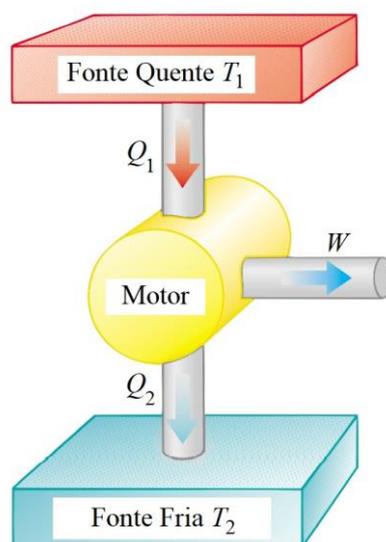
O processo politrópico geralmente não é explorado em livros didáticos do ensino básico, mas este pode ser introduzido através de exemplos conhecidos. Se considerarmos a equação da calorimetria, que relaciona a quantidade de energia Q que um sistema perde ou adquire através de calor com sua variação de temperatura e sua capacidade térmica, $Q = C\Delta T$, tem-se que para $C = 0$ (constante) tem-se $Q = 0$, o que caracteriza um processo adiabático. Isso mostra que um processo adiabático pode ser considerado como um processo politrópico. Quando consideramos o caso particular das capacidades térmicas obtidas a volume e a pressão constantes, C_V e C_P , respectivamente, para um gás monoatômico ideal, estas são independentes da temperatura e são constantes, de maneira que processos isovolumétricos e isobáricos para um gás monoatômico ideal, especificamente, são também processos politrópicos. Estes processos são mais gerais e

podem descrever múltiplos processos de compressão e expansão que envolvem transferência de energia através de calor.

Os cinco processos mencionados, isotérmico, adiabático, politrópico, isocórico e isobárico são básicos em Termodinâmica.

Como já discutido, o motor a combustão interna é um dispositivo que opera ciclicamente. Operar em um ciclo de trabalho significa que, após a realização de diferentes processos termodinâmicos na mistura ar-combustível, o sistema volta ao seu estado inicial. Para entendermos melhor o ciclo de trabalho do motor que utilizamos vamos apresentar inicialmente o ciclo de trabalho de uma máquina térmica ideal, descrito pelo *Ciclo de Carnot*. Antes disso, vamos utilizar o diagrama geral de um motor térmico ilustrado na figura A.13 para mostrar como a Primeira e a Segunda Leis da Termodinâmica podem ser utilizadas para discutir a importância das fontes térmicas no funcionamento de uma máquina térmica e definir sua eficiência.

Figura A.13 – Diagrama geral de uma máquina térmica, mostrando a energia Q_1 transferida da fonte quente à temperatura T_1 para o motor através de calor, a energia Q_2 dissipada pelo motor através de calor para a fonte fria à temperatura $T_2 < T_1$ e a energia mecânica W proveniente da conversão da energia térmica através de trabalho.



Fonte: Figura adaptada de Halliday, Resnick e Walker (p. 671, 2007).

Neste diagrama apresentamos dois reservatórios ou fontes térmicas, sendo uma fonte quente à temperatura T_1 e uma fonte fria à temperatura T_2 , de maneira que $T_1 > T_2$. Isso é justificado pelo enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei da Termodinâmica, que estabelece o seguinte: *É impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclo, tenha como*

único efeito, absorver energia através de calor de um reservatório térmico e converter esta em uma quantidade equivalente de energia através de trabalho (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007).

Como o processo é cíclico, uma máquina térmica precisa de pelo menos duas fontes térmicas com temperaturas diferentes para que o estado inicial do sistema seja restabelecido e a máquina possa operar de maneira adequada.

No caso do motor de combustão interna, a energia total Q_1 representa a energia adquirida pelo motor através da explosão da mistura ar-combustível. A energia mecânica W responsável por colocar o veículo em movimento não pode ser maior do que Q_1 . Na verdade não é possível nem fazer com que $W = Q_1$, pois existem perdas de energia nos processos de funcionamento do motor. Estas perdas são representadas pelo parâmetro Q_2 .

Pela Primeira Lei da Termodinâmica, equação (A.1), obtemos para um processo cíclico $Q = W$, uma vez que $\Delta U = 0$, sendo $Q = Q_1 - Q_2$, ou seja, o diagrama da máquina térmica apresentado na figura A.13 nos fornece:

$$Q_1 = W + Q_2. \quad (A.2)$$

Este resultado nos mostra realmente que parte da energia total Q_1 é convertida em energia mecânica W , através de trabalho, e parte Q_2 é dissipada e/ou consumida pela máquina térmica para restabelecer o ciclo de trabalho. Isso significa que é impossível completar um ciclo do motor sem uma compensação, ou seja, não é possível restabelecer o estado inicial do ciclo sem o consumo de combustível para compensar tais perdas. A energia responsável para comprimir a mistura no cilindro ou pelo aquecimento da carcaça do motor ou do capô do carro não pode ser revertida para ser totalmente convertida em energia mecânica com a finalidade de fazer o virabrequim girar apenas. Portanto, se quisermos uma quantidade específica de energia mecânica W de um motor é necessário uma quantidade de energia $Q_1 > W$ para compensar o consumo e as perdas do motor, como mostrado na equação (A.2).

A energia da fonte quente de um motor de combustão interna é obtida da explosão da mistura ar-combustível na câmara de combustão. Mas como podemos identificar a fonte fria deste motor, se é necessário pelo menos duas fontes térmicas para o motor operar ciclicamente?

A fonte fria em um motor de combustão interna é estabelecida através do sistema de refrigeração ou arrefecimento. Este pode ser feito utilizando-se o próprio ar que circula em torno do bloco do motor ou um sistema para a circulação de água nas regiões de maior temperatura do motor.

O motor que utilizamos é um exemplo de motor refrigerado a ar. Toda a sua carcaça e o ar na vizinhança do mesmo funciona como fonte fria. A energia flui espontaneamente através de calor do corpo de maior temperatura, no caso as paredes do cilindro onde ocorre a explosão da mistura, para os corpos de menor temperatura, incluindo a carcaça do motor e seus componentes e o ar. Como já discutido anteriormente, o nosso motor possui aletas de refrigeração na forma de cunhas na região do cabeçote e do cilindro com o objetivo de aumentar a superfície de contato do motor exposta ao ar e garantir um resfriamento efetivo para o funcionamento adequado do motor. Como os blocos dos motores são feitos de metal, como ferro fundido ou ligas de alumínio, esse escoamento de energia é facilitado, pois os metais são bons condutores de energia através de calor ou, equivalentemente, estes são bons condutores térmicos.

Nos motores refrigerados a água o sistema de arrefecimento é composto por peças como bomba d'água, radiador, sensor de temperatura, válvula termostática, ventoinha, reservatório e aditivo. A bomba d'água faz com que a água, junto com o aditivo, circule pelas galerias do bloco do motor. O aditivo tem a importante função de elevar a temperatura de ebulição da água, para que a mesma não evapore durante o processo de troca de energia com o motor, diminuir sua temperatura de congelamento, para evitar que a água no sistema congele em lugares muito frios quando o veículo estiver parado e ainda prevenir a oxidação do motor. A evaporação da água é ainda mais dificultada porque o sistema opera em um fluxo fechado. Após retirar energia do motor, a água quente é bombeada para o radiador para que a mesma seja resfriada para retornar ao motor. O radiador é composto por vários tubos e lâminas metálicas para facilitar a troca de energia da água com a atmosfera. Caso a temperatura da água seja tão excessiva que a circulação da mesma no radiador não seja suficiente para o seu resfriamento, a ventoinha é acionada para auxiliar no processo. Esta é direcionada diretamente para o radiador.

O controle de temperatura nestes motores é feito por um sensor de temperatura, que indica o valor da temperatura no motor, e a válvula termostática. Quando acionamos o motor de um carro refrigerado a água, a válvula termostática fica fechada para que o motor seja aquecido e atinja a temperatura ideal de funcionamento mais rapidamente. Quando esta é atingida, sua manutenção é estabelecida pela abertura desta válvula para que a água que passa pelo bloco seja bombeada para o radiador. Esse processo é muito importante, pois se a válvula termostática estiver sempre aberta a fonte quente do motor será afetada de maneira que sua temperatura irá diminuir comprometendo a eficiência do motor térmico e se a válvula ficar sempre fechada, perde-se a fonte fria do sistema e o motor “ferve” literalmente.

De maneira geral o sistema de arrefecimento é responsável por manter a fonte fria do motor térmico em uma temperatura adequada, pois de outra forma o aumento excessivo de temperatura pode causar danos irreparáveis às peças do motor. É por isso que devemos parar um veículo imediatamente quando há problemas no sistema de arrefecimento do motor.

A eficiência ou o rendimento térmico η de um motor térmico é definido como a razão da energia mecânica W , obtida através de trabalho, pela quantidade total de energia térmica Q_1 fornecida ao sistema pela fonte quente através de calor (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007),

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (A.3)$$

Pela equação (A.2) tem-se que $Q_2 < Q_1$, de maneira que $Q_2/Q_1 < 1$. Consequentemente, a eficiência da máquina térmica será sempre $\eta < 1$, ou seja, menor do que 100%, em pleno acordo com o enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei da termodinâmica. Como já discutido, esse resultado já era esperado, pois além das dissipações existe o consumo de energia no sistema para o restabelecimento do ciclo de trabalho. Se estes não existissem teríamos $Q_2 = 0$, o que pela equação (A.3) forneceria $\eta = 1$.

Dessa forma, a Segunda Lei estabelece a impossibilidade de conversão completa da energia térmica fornecida ao motor pela fonte quente em uma quantidade equivalente de energia mecânica, ou seja, é impossível construir um motor térmico com eficiência de 100%. Um motor desse tipo é chamado de *moto perpétuo de segunda espécie*. Se este motor pudesse ser concebido ele seria autossuficiente, consumindo a própria energia produzida para manter-se em funcionando.

Se um motor térmico não pode ter eficiência de 100%, qual é a sua eficiência máxima? A resposta para esta pergunta é fornecida pelo ciclo de trabalho de Carnot.

Como o fluxo espontâneo de energia através de calor é um *processo irreversível*, Carnot percebeu que o máximo rendimento de um motor térmico poderia ser obtido através de *processos reversíveis*. A partir destes processos, o sistema pode retornar às mesmas condições iniciais ao longo da mesma trajetória em um diagrama de pressão em função do volume (PV). Caso isso não possa ser estabelecido o processo é irreversível, devido às perdas de energia. Todos os processos naturais são irreversíveis, portanto, o que Carnot propôs foi uma idealização, impossível de ser concebida experimentalmente, mas de extrema importância para conhecermos o limite superior para o rendimento de todos os motores térmicos reais.

Dois processos reversíveis característicos, em que não há fluxo espontâneo de energia através de calor, são o processo isotérmico (T constante) e o processo adiabático ($Q = 0$). Dessa

forma, o ciclo de trabalho de Carnot é um ciclo ideal composto por duas isotermas e duas adiabáticas, como mostrado no diagrama PV apresentado na figura A.14.

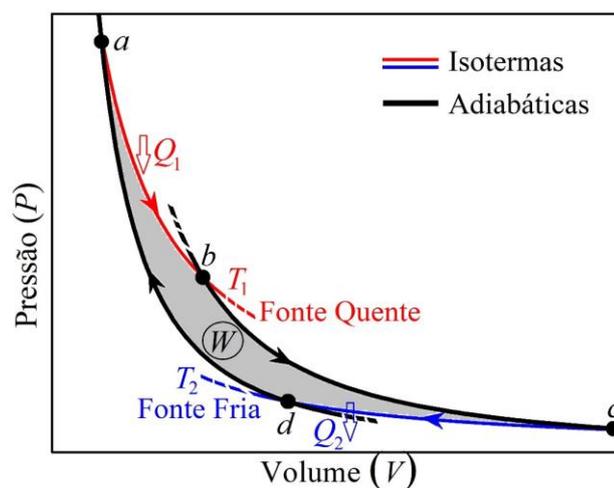
O motor térmico de Carnot opera entre duas fontes térmicas com temperaturas T_1 e T_2 , com $T_1 > T_2$. Ele assumiu que a substância de trabalho, equivalente à mistura ar-combustível no motor de combustão interna que utilizamos, é um gás ideal, cuja equação de estado térmica é dada por (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007):

$$PV = nRT, \quad (A.4)$$

sendo n o número de mols do gás e R a constante universal dos gases. Ele considerou também que o gás estava contido em um cilindro com um único pistão, semelhante ao motor que utilizamos, mas as paredes do cilindro não eram consideradas como condutoras térmicas em todos os processos do ciclo (NOGUEIRA, 2020). Ou seja, ele exclui teoricamente a possibilidade de dissipação de energia através de calor.

Pela equação (A.4) obtemos diretamente que $PV = k(T)$ para um processo isotérmico (T cte), sendo $k(T)$ uma constante que depende da temperatura.

Figura A.14 – Diagrama da pressão P em função do volume V para o Ciclo de Carnot. Este é composto por dois processos isotérmicos ab e cd , cujas isotermas são caracterizadas pelas temperaturas T_1 e T_2 das fontes quente e fria, respectivamente, e dois processos adiabáticos bc e da , em que $Q = 0$. A energia obtida da fonte quente no processo ab através de calor é Q_1 e a energia dissipada para a fonte fria no processo cd é dada por Q_2 . A área cinza do ciclo fechado representa a quantidade de energia térmica convertida em energia mecânica W através de trabalho. As isotermas plotadas são do tipo $PV = k(T)$ e as adiabáticas $PV^\gamma = k(S)$, sendo S a entropia. O coeficiente adiabático utilizado foi $\gamma = 5/3$, característico para gases monoatômicos ideais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se um gás ideal sofre um processo de compressão ou expansão adiabática tem-se que,,

$$PV^\gamma = k(S), \quad (A.5)$$

com a constante $k(S)$ sendo dependente da entropia S do sistema, que é mantida constante em um processo adiabático. Esta propriedade física será definida mais adiante. O coeficiente adiabático γ neste caso é característico para gases monoatômicos ideais, dado por $\gamma = 5/3$ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Como $\gamma > 1$, uma adiabática decai mais rapidamente que uma isoterma no diagrama PV , conforme mostrado na figura A.14.

Dessa forma, o ciclo de Carnot é iniciado com uma expansão isotérmica ab , veja figura A.14. Como o gás está em contato térmico com a fonte quente de temperatura T_1 , este absorve a energia Q_1 através de calor durante a expansão. Se pensarmos na estrutura do cilindro do motor que utilizamos, este processo é equivalente ao movimento descendente do pistão, causado pela expansão do gás. Como o gás empurra o pistão para baixo, energia térmica é convertida em energia mecânica W_{ab} através de trabalho.

No processo de expansão adiabática bc da figura A.14, nenhuma energia é adquirida ou perdida pelo gás no interior do cilindro, como se o mesmo fosse isolado termicamente para a realização deste processo. Consequentemente, a temperatura do gás diminui para T_2 durante a expansão. Neste processo mais energia térmica é convertida em energia mecânica W_{bc} através de trabalho, com o pistão sendo empurrando mais ainda para baixo.

No processo cd o gás é colocado em contato térmico com a fonte fria, sendo comprimido pelo pistão isotermicamente à temperatura T_2 . Durante a compressão do gás a energia mecânica W_{cd} do pistão é convertida em energia térmica Q_2 através de trabalho, a qual é fornecida à fonte fria através de calor para manter a temperatura do gás constante.

O ciclo de Carnot é finalizado com a compressão adiabática do gás no processo da . A temperatura do mesmo é elevada para T_1 devido à conversão de energia mecânica W_{da} em energia térmica.

No ciclo fechado de Carnot, o trabalho resultante de todos os quatro processos é dado pela área cinza representada no diagrama PV da figura A.14 no interior do ciclo, ou seja,

$$W = \text{Área do ciclo.} \quad (A.6)$$

Nos processos em que ocorre a compressão do gás a variação no volume é negativa, ou seja, $\Delta V < 0$, pois o volume final é menor que o volume inicial. Nestes processos energia mecânica do pistão é convertida em energia térmica do gás. Para a expansão do gás tem-se $\Delta V > 0$, com energia térmica do gás sendo convertida em energia mecânica do pistão. Como o ciclo é estabelecido no sentido horário no diagrama PV , a conversão de energia térmica em energia mecânica através de trabalho é positiva, ou seja, $W > 0$. Neste caso energia útil é obtida do motor.

Para o ciclo de Carnot é possível mostrar que (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, p. 678, 2007),

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (A.7)$$

de maneira que a eficiência da máquina de Carnot η_C pode ser reescrita a partir da equação (A.3) como:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (A.8)$$

Com a expressão (A.8) Carnot mostrou que a eficiência de uma máquina reversível independe da substância de trabalho utilizada, sendo determinada apenas pelas temperaturas das fontes quente e fria. Isso é equivalente a dizer que a eficiência de um motor independe do tipo de combustível utilizado.

A equação (A.8) também nos permite concluir que se houver superaquecimento do motor, como no caso da válvula termostática do sistema de arrefecimento não abrir, a eficiência do motor vai a zero à medida que a fonte fria é aquecida, ou seja, $T_2 \rightarrow T_1$. O resultado obtido por Carnot também nos permite concluir que à medida que a diferença $T_2 - T_1$ aumenta, maior será a eficiência do motor. A temperatura ambiente no Brasil varia em média entre 20 e 30 °C, o que forneceria uma fonte fria com temperatura em torno de $T_2 = 300 K$, de maneira que o esforço para aumentar a eficiência de um motor térmico seria direcionado para aumentar a temperatura da fonte quente T_1 .

Para que um motor tenha eficiência de 100%, seria necessário que a fonte fria operasse no zero absoluto $T_2 = 0 K$, mas este tipo de fonte é inconcebível (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Isso mostra que mesmo para um motor térmico ideal é impossível obter eficiência térmica de 100%.

A.2.5.2 Entropia

A relação apresentada na equação (A.7) só é válida para um motor térmico reversível, em que não há fluxo espontâneo de energia através de calor em seu ciclo de trabalho. Esta pode ser reescrita como $Q_2/T_2 = Q_1/T_1$, mostrando que a razão Q/T para a fonte quente é a mesma para a fonte fria neste caso.

Para um motor real, como o que utilizamos, operando em um ciclo de trabalho irreversível, a quantidade de energia térmica convertida em energia mecânica W_{irr} será menor que a mesma para um motor reversível W_{rev} , ou seja, $W_{irr} < W_{rev}$, para a mesma quantidade de energia Q_1 fornecida pela fonte quente através de calor. Como já discutido, isso é esperado

devido às perdas de energia que provocam o aquecimento da carcaça do motor e outras partes do sistema, por exemplo. Pela equação (A.3) tem-se,

$$\frac{W_{irr}}{Q_1} < \frac{W_{rev}}{Q_1} \rightarrow \eta_{irr} < \eta_{rev},$$

ou seja, a eficiência de um motor térmico real é sempre menor que a eficiência da máquina reversível ideal de Carnot. Dessa forma, o ciclo de Carnot nos fornece um limite superior, ou máximo, para a eficiência de uma máquina térmica. Pelas equações (A.3) e (A.8) obtemos,

$$\begin{aligned} \eta_{irr} < \eta_{rev} &\rightarrow 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1}, \\ -\frac{Q_2}{Q_1} &< -\frac{T_2}{T_1}, \\ \therefore \frac{Q_1}{T_1} &< \frac{Q_2}{T_2}. \end{aligned} \quad (A.9)$$

A razão Q/T é definida como a mudança da entropia ΔS do sistema quando energia é transferida através de calor à temperatura constante (BREITHAUPT, 2000). Da equação (A.7) já mostramos que $Q_2/T_2 = Q_1/T_1$, de maneira que $\Delta S = S_2 - S_1 = 0$. Isso significa que para uma máquina operando em um ciclo de trabalho reversível não há mudança na entropia do sistema, pois a perda de entropia da fonte quente é igual ao ganho de entropia da fonte fria. Já no caso de um motor real, irreversível, a equação (A.9) mostra que $S_2 > S_1$, de maneira que $\Delta S > 0$. Logo, o ganho de entropia na fonte fria de um motor térmico real é maior do que a perda de entropia na fonte quente.

Mas o que significa ganhar ou perder entropia?

Nos processos adiabáticos não existe transferência de energia através de calor $Q = 0$. Consequentemente, a entropia nestes processos se mantém constante, uma vez que $\Delta S = Q/T$, justificando o porquê de termos considerado a constante $k(S)$ da equação (A.5) como sendo dependente da entropia. Estes processos também são conhecidos como *isentropicos*. Vimos que esse resultado $\Delta S = 0$ também é observado para o ciclo de Carnot, pois o ciclo é reversível, não havendo espalhamento ou fluxo espontâneo de energia através de calor. Isso significa que se fosse possível um motor operar com o ciclo de Carnot, este nunca teria sua carcaça aquecida, pois não há desperdício ou gasto de energia no cilindro para o seu próprio aquecimento.

Portanto, a entropia mede o quanto a energia proveniente da fonte quente é espalhada através de calor em uma determinada temperatura, sendo desperdiçada e impossibilitada de ser convertida em energia mecânica através de trabalho. Dessa forma, quando ocorre a explosão da mistura na câmara de combustão do nosso motor, a energia que escoava através das paredes do

cilindro para o bloco, para o ar e outras partes do motor ou do veículo através de calor, não pode ser drenada de volta para a câmara para ser convertida em energia mecânica, pois como já discutido, os processos em que ocorre o fluxo espontâneo de energia através de calor são irreversíveis. Logo, a entropia pode ser vista também como a medida da irreversibilidade de um processo. Quanto maior a entropia, maior será o desperdício de energia através de calor em uma determinada temperatura e conseqüentemente, menor será a eficiência do motor. O resultado $\Delta S > 0$ é conhecido como a *lei do aumento da entropia*.

A.2.5.3 Os quatro tempos do motor utilizado e o ciclo de Otto

Após todas as discussões e conceitos apresentados nas seções anteriores, podemos agora descrever e entender, do ponto de vista da Termodinâmica, como é o ciclo de trabalho do motor de combustão interna que utilizamos.

Como discutido na seção A.2.1.1 o motor que utilizamos é um motor de combustão interna de ignição por centelha, com um único pistão e funciona com ciclo de trabalho de quatro tempos. Em cada ciclo o pistão é movido para cima duas vezes e para baixo duas vezes, representando os quatro tempos do motor. A substância de trabalho deste motor é a mistura ar-gasolina e os processos termodinâmicos em seu ciclo de trabalho podem ser aproximados pelo *Ciclo de Otto ideal*.

O ciclo desenvolvido em um cilindro de um motor de combustão interna é muito complexo. Quando a mistura ar-combustível é inserida no cilindro, ela é misturada com uma quantidade residual das substâncias provenientes da combustão do ciclo anterior. Dessa forma, quando a mistura é comprimida e o processo de combustão é realizado, há uma mudança na composição dos produtos na exaustão, consistindo em sua maior parte em dióxido de carbono CO_2 , água H_2O , nitrogênio N_2 e outros gases em menor quantidade. Após um processo de expansão, a válvula de exaustão é aberta e estes gases são expelidos para fora do cilindro, configurando um ciclo aberto com mudanças na composição da substância de trabalho. Para tornar a análise termodinâmica do ciclo do motor viável, o ciclo real é aproximado por um ciclo ideal em que é considerado ar como substância de trabalho, de maneira semelhante ao que foi desenvolvido por Carnot (PULKRABEK, 1997).

Dessa forma, a mistura ar-gasolina no motor que utilizamos é tratada como ar para todo o ciclo de trabalho, com o ar sendo considerado como um gás ideal. A análise com o ciclo fechado é mais simplificada do que com o ciclo aberto real. Neste caso, assumimos que o ar que é expelido do cilindro na exaustão, realimenta o sistema na admissão. O processo de

combustão é substituído pela adição da energia Q_1 no sistema através de calor por uma fonte quente interna, pois o ar sozinho não entra em combustão. A exaustão, que é um processo aberto, é substituído por um processo fechado em que há a rejeição de energia Q_2 para a fonte fria. Uma vez que o ciclo de trabalho do motor que utilizamos é da ordem de 10^{-2} segundo, os processos envolvidos no mesmo podem ser aproximados por processos ideais reversíveis, como isovolumétricos, isobáricos e adiabáticos. Portanto, a análise termodinâmica que fazemos para o ciclo de trabalho do motor que utilizamos, dado pelo ciclo de Otto, é semelhante ao que foi feito na seção A.2.5.1 para o ciclo de Carnot.

O ciclo de Otto recebeu este nome em homenagem a Nicolaus Otto que foi um dos primeiros desenvolvedores deste tipo de motor. O ciclo ideal para um motor de quatro tempos, naturalmente aspirado, como o que utilizamos, é apresentado na figura A.15. Este é o ciclo da maioria dos motores de automóveis.

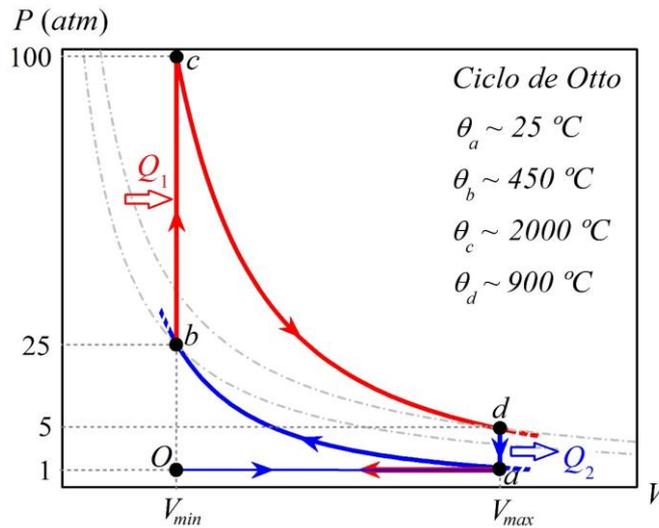
O ciclo do motor começa com o pistão na posição de volume mínimo (V_{min}), ou volume morto, da câmara de combustão, obtido com a altura máxima que o pistão alcança, também conhecido como Ponto Morto Superior (PMS) ou TDC, do inglês *Top-Dead-Center*. Nesta posição as válvulas de admissão e exaustão no cabeçote estão fechadas.

Quando o pistão desloca-se para baixo em seu *primeiro tempo*, a válvula de admissão é aberta e tem-se o início do processo de admissão Oa no diagrama PV do ciclo de Otto apresentado na figura A.15. Este é aproximado por um processo isobárico à pressão atmosférica de $1\ atm$ e temperatura ambiente ($\theta_a \approx 25\ ^\circ C$). Para facilitar a visualização dos tempos do motor durante os processos termodinâmicos descritos na figura A.15, apresentamos na figura A.16 ilustrações das posições do pistão (parte superior) junto com fotos das mesmas (parte inferior) para o pistão do nosso motor.

O *segundo tempo* do motor é iniciado com o pistão na posição de Ponto Morto Inferior (PMI) ou BTC (*Bottom-Dead-Center*), que caracteriza o volume máximo (V_{max}) da câmara de combustão. O pistão move-se para cima comprimindo adiabaticamente a mistura ar-gasolina no processo ab , idealizado na figura A.15. Neste processo há um aumento significativo da pressão e da temperatura da mistura, em torno de $25\ atm$ e $450\ ^\circ C$ no ponto b , respectivamente. Este é seguido por uma compressão isovolumétrica bc no diagrama PV para representar o processo de combustão da mistura.

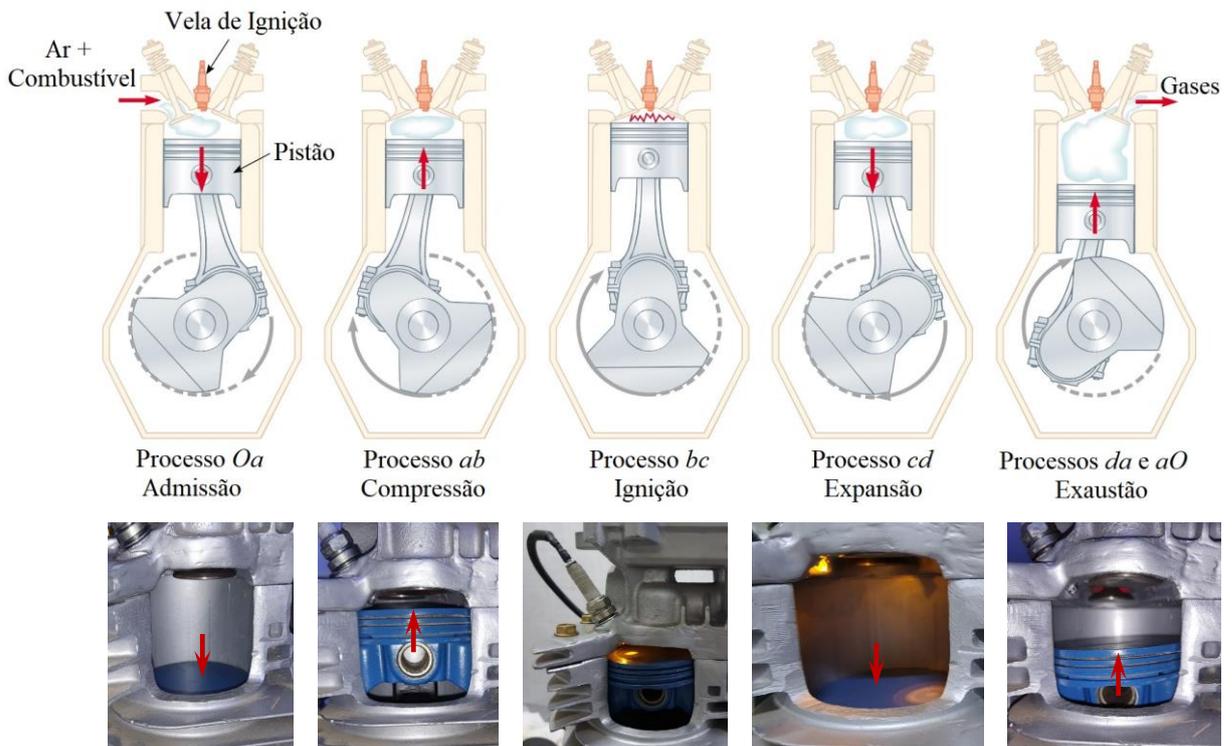
Durante a combustão a mistura adquire uma grande quantidade de energia através de calor, representada por Q_1 , fazendo com que os picos de pressão e temperatura do ciclo sejam atingidos no ponto c , em torno de $100\ atm$ e $2.000\ ^\circ C$, respectivamente.

Figura A.15 – Diagrama PV do ciclo de trabalho de Otto ideal, mostrando os 6 processos termodinâmicos que representam aproximadamente o funcionamento do motor de combustão interna que utilizamos. Os processos apresentados são: Oa – admissão da mistura ar-gasolina; ab – compressão adiabática da mistura; bc – ignição da mistura (fonte quente), provocando uma compressão isovolumétrica; cd – expansão adiabática dos gases provenientes da combustão da mistura; da – descompressão da câmara pela abertura da válvula de exaustão (fonte fria) e aO – exaustão. As isotermas (curvas tracejadas pontilhadas) que passam pelos pontos b e d mostram que $\theta_b < \theta_d$. Estas e as adiabáticas são do mesmo tipo que aquelas apresentadas na figura A.14.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.16 – Os quatro tempos do motor de combustão interna utilizado, descritos pelas setas vermelhas, conforme os processos termodinâmicos do ciclo de Otto ideal apresentado na figura A.16.



Fonte: Superior: Figura adaptada de Halliday, Resnick e Walker (p. 680, 2007). Inferior: Elaborado pelo autor.

Este aumento significativo de energia no sistema com o pistão na posição PMS faz com que o *terceiro tempo* do motor seja iniciado. A alta pressão na câmara força o pistão a descer violentamente de volta para a posição PMI, conforme figura A.16, convertendo parte da energia térmica Q_1 da combustão em energia mecânica W_{cd} através de trabalho, provocando a rotação do virabrequim. Este processo de expansão no motor real é representado pelo processo adiabático cd do ciclo de Otto na figura A.15. Durante o mesmo os valores da pressão e da temperatura no cilindro diminuem à medida que o volume aumenta, atingindo os respectivos valores de 5 atm e $900 \text{ }^\circ\text{C}$ no ponto d , aproximadamente.

O terceiro ciclo é finalizado quando o pistão retorna à posição PMI, ponto a do ciclo de Otto, com a abertura da válvula de exaustão. Esse procedimento faz com que os gases no cilindro sejam expelidos para a atmosfera devido à diferença de pressão entre a câmara e o ambiente. Tanto a pressão quanto a temperatura são reduzidas drasticamente, em boa aproximação, para as condições ambientais de 1 atm e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ devido à expansão dos gases. Como já discutido, este processo é aberto em um motor real, mas é representado no ciclo de Otto ideal da figura A.15 pelo processo isovolumétrico da fechado, com a transmissão da energia Q_2 para a fonte fria do motor.

As cores azul e vermelha no ciclo de Otto da figura A.15 foram utilizadas, respectivamente, para representar as menores e maiores temperaturas atingidas no ciclo. Para deixar isso mais claro plotamos duas isotermas passando pelos pontos b e d mostrando que $\theta_b < \theta_d$. Como isso não é muito bem definido nas partes do motor real, uma vez que há muitas variações de temperatura no sistema, nós pintamos o duto de admissão na cor azul, para sugerir baixas temperaturas, pois este recebe a mistura à temperatura ambiente, e o duto de exaustão em vermelho, para representar altas temperaturas, uma vez que os gases provenientes da combustão são expelidos através do mesmo. No caso do motor que utilizamos, o processo de combustão interna é a fonte quente do sistema. Como os balacins são responsáveis por abrir e fechar as válvulas de admissão e exaustão através do comando de válvulas, estes também foram pintados nas cores respectivas, como mostrado nas fotos da figura A.17.

No *quarto tempo* do motor o pistão é movido para cima com a válvula de exaustão aberta, veja figura A.16, para a expulsão de todos os gases provenientes da combustão. Quando este atinge a posição PMS o virabrequim terá realizado duas revoluções, a válvula de exaustão é fechada, a de admissão aberta e um novo ciclo de trabalho é iniciado. No ciclo de Otto ideal este processo é representado pelo processo isobárico dO , conforme figura A.15.

Figura A.17 – Fotos mostrando o duto de admissão na cor azul à esquerda, o duto de exaustão em vermelho no centro, pintados para fornecer uma representação visual para os estudantes das menores e maiores temperaturas, respectivamente, do ciclo de Otto. Os balancins à direita também foram pintados nas respectivas cores, pois são responsáveis pela abertura das válvulas de admissão (inferior à esquerda) e exaustão (inferior no centro).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se a substância de trabalho ar-gasolina for considerada como um gás ideal é possível mostrar que a eficiência η_o de um motor operando com o ciclo de trabalho de Otto é dada por:

$$\eta_o = 1 - \frac{1}{(V_{max}/V_{min})^{\gamma-1}} \quad , \quad (A.10)$$

conforme Halliday, Resnick e Walker (p. 681, 2007). A razão entre o volume máximo V_{max} da câmara, dado pela posição PMS do pistão, e o seu volume mínimo V_{min} , com o pistão na posição PMI, é conhecida como taxa de compressão $r_c = V_{max}/V_{min}$. Dessa forma, a eficiência térmica do motor de Otto ideal só depende deste parâmetro. Considerando $\gamma = 1,35$, a eficiência térmica η_o pode atingir valores acima de 50% com o aumento de r_c (PULKRABEK, 1997). Este resultado está bem acima da eficiência térmica de motores reais a gasolina, a qual varia entre 15 e 20%. Esta diferença é esperada devido aos efeitos dissipativos como a existência de atrito, fluxo espontâneo de energia através de calor pelas paredes do cilindro provocando o aquecimento de todo o bloco do motor e sua vizinhança, combustão incompleta da mistura ar-gasolina, entre outros.

Se fosse possível conceber um volume mínimo nulo $V_{min} = 0$ na câmara de combustão do motor teríamos um rendimento de 100% com o motor de Otto ideal, conforme a equação (A.10). A impossibilidade de verificação deste resultado é análoga à obtida para o motor de

Carnot se considerarmos a temperatura de zero absoluto $T_2 = 0 K$ na fonte fria, pois ambos são fisicamente inconcebíveis. Um volume mínimo nulo na câmara significaria a desintegração da mistura ar-gasolina. Isso não é possível porque os átomos que compõem tal mistura possuem um volume mínimo e o sistema neste volume torna-se incompressível.

Sugestão de abordagem: para a apresentação da Segunda Lei da Termodinâmica e a análise termodinâmica do ciclo de trabalho Otto do motor que utilizamos, sugerimos que o professor utilize a sequência de tópicos apresentada nesta seção. Esta pode ser desenvolvida através de um método socrático, com o professor promovendo a reflexão e a descoberta pelos estudantes com o uso de questões norteadoras durante o diálogo. No texto acima apresentamos alguns exemplos de questões que podem ser exploradas pelo professor. Todo o texto e as equações foram preparados em uma linguagem facilitada para o professor utilizar diretamente em suas aulas como sugestão de abordagem.

Para o estabelecimento da relação entre o ciclo de Carnot e o ciclo de Otto ideal, durante a análise termodinâmica do ciclo de trabalho do motor, é muito importante que o professor ilustre os conceitos diretamente no motor, como apresentado nas fotos da figura A.16. Nesta figura é possível notar a vantagem de utilizarmos um motor monocilíndrico, pois os quatro tempos de um motor de combustão interna é usualmente explicado com diagramas com um único cilindro. Com o nosso motor é possível fazer uma transposição didática direta do que é tratado teoricamente em comparação com um sistema real.

O professor pode ainda explorar assuntos complementares comuns no cotidiano dos alunos durante a discussão dos processos termodinâmicos envolvidos no ciclo de trabalho, como a eficiência de motores movidos com diferentes combustíveis como álcool, gasolina, diesel e gás natural, ou motores de combustível flexível (*Flex*) que utilizam tanto álcool quanto gasolina, sobre biocombustíveis e a importância de outras fontes de energia para a proteção do meio ambiente, sobre o que são as cilindradas de um motor e também sobre outros conceitos de Física envolvidos na descrição do movimento do pistão e outras partes do motor.

Ao falar sobre o terceiro tempo do motor, por exemplo, é natural surgir a seguinte pergunta: se o terceiro tempo é responsável pela conversão de energia térmica em mecânica no motor, de onde é proveniente a energia que faz com que o motor realize os dois primeiros tempos quando o pistão do motor ainda está parado?

Se pensarmos em um veículo, como o trator cortador de grama que utiliza o motor cujo ciclo de trabalho foi analisado, a primeira coisa que fazemos para acionar o mesmo é dar a partida. Ao ligarmos a chave do veículo acionamos o seu *motor de arranque*, dado por um motor elétrico alimentado por uma bateria. Esta é a fonte de energia inicial para impulsionar o

pistão do motor quando ele ainda está parado. Se o sistema estiver funcionando de maneira adequada o pistão continua o seu movimento por inércia, sem a necessidade da intervenção do motor de arranque. É por isso que um veículo não funciona quando sua bateria está descarregada, pois não é possível fazer o pistão se mover no motor para realizar a admissão da mistura e também para produzir a centelha que provoca a combustão da mesma através da vela de ignição. Em veículos com injeção eletrônica e outros dispositivos eletrônicos, a situação é ainda pior, pois estes dependem da energia elétrica fornecida pela bateria para desenvolver e regular várias funcionalidades no motor.

Quando forçamos o motor do veículo a girar, fazemos o papel do motor de arranque. Esse procedimento é conhecido como *dar um tranco* no veículo. Existe um dispositivo chamado de *alternador automotivo* que faz com que a energia mecânica gerada pelo movimento do motor seja convertida em energia elétrica para recarregar a bateria e alimentar os componentes eletrônicos e elétricos do veículo, como as velas de ignição. Após o tranco, se o problema for só a bateria descarregada, é possível restabelecer o funcionamento do motor. O tranco faz com que o motor sofra um impacto muito grande que pode sobrecarregar o sistema e causar sérios danos nos cilindros. Este procedimento deve ser evitado não só pelo comprometimento da configuração mecânica do motor, pois com a evolução de tecnologia os veículos são equipados atualmente com vários dispositivos eletrônicos que podem ser ainda mais danificados caso o motor seja forçado a funcionar em uma pane. O mais recomendável a se fazer nesta situação é procurar um serviço especializado.

Com relação ao movimento do pistão e outras partes do motor o professor pode utilizar nosso motor para abordar conteúdos de Mecânica como na conversão do movimento linear de sobe e desce do pistão no movimento circular do virabrequim, o conceito de força, torque e potência do motor, entre outros.

A seguir apresentamos uma sugestão de sequência didática organizada para a discussão dos tópicos apresentados nesta seção com o uso do motor de combustão interna para ser utilizada em sala de aula.

A.3 SEQUÊNCIA DIDÁTICA SUGERIDA

Esta sequência didática foi elaborada com o intuito de discutir conceitos fundamentais da Termodinâmica como calor, trabalho, temperatura e energia e como estes podem ser contemplados em um contexto aplicado, com o uso de uma tecnologia muito presente no cotidiano dos alunos, dada por um motor de quatro tempos devidamente preparado para ser utilizado como ferramenta didática.

A sequência didática sugerida é organizada em três momentos:

- Atividade 1: Levantamento do conhecimento prévio dos estudantes;
- Atividade 2: Discussão dos conceitos de Termodinâmica com o uso do motor;
- Atividade 3: Revisão das respostas dos questionários aplicados.

A primeira atividade é destinada para a apresentação da proposta e para fazer um levantamento do conhecimento prévio dos estudantes através de um questionário diagnóstico, fornecido aos alunos no início da atividade. Caso os alunos já sejam familiarizados com o tema, em anos anteriores, esta atividade pode ser pensada para ter um caráter de revisão. Em seguida, na atividade 2, os mesmos conceitos são trabalhados de maneira mais aprofundada com o auxílio do motor de combustão interna. A sugestão nesta etapa é organizar o conhecimento discutido na atividade 1 em um contexto aplicado para poder trabalhar melhor outros conceitos como os ciclos termodinâmicos ideais de Carnot e de Otto, para a definição de rendimento de uma máquina térmica, e como o ciclo de Otto em um diagrama PV , que é o ciclo de trabalho do motor utilizado, pode ser interpretado na realidade através do movimento do pistão do motor. A atividade 2 é importante para a discussão de conceitos que usualmente não são definidos de maneira correta, do ponto de vista científico, nos livros didáticos, como calor, trabalho, energia e entropia. Quando estes são considerados, a abordagem é feita usualmente de maneira muito abstrata ou matematicamente, sem um significado físico satisfatório que possa ser traduzido em um contexto aplicado.

Ao final da atividade 2 o professor pode aplicar novamente o questionário diagnóstico para efeito de comparação e análise de resultados sobre o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos, ou revisados, na atividade 1. No caso destas atividades serem introdutórias sobre o assunto, o professor pode optar pela aplicação de questionários de múltipla escolha.

A sequência didática sugerida é finalizada com a atividade 3 para revisar e discutir as respostas dos questionários aplicados apresentadas pelos estudantes, com o intuito de sanar dúvidas conceituais importantes que permaneceram durante a execução da atividade 2.

Para a execução desta sequência didática, sugerimos que a mesma seja desenvolvida em pelo menos 4 aulas de 45 minutos. Os planos de aula sugeridos são apresentados a seguir considerando cada atividade separadamente.

A.3.1 Atividade 1: Levantamento do conhecimento prévio dos estudantes

Objetivos: Mapear o conhecimento prévio dos estudantes através de um questionário diagnóstico fornecido aos estudantes no início da aula. Em seguida o professor pode desenvolver o tema proposto teoricamente utilizando as questões do questionário diagnóstico para nortear as discussões. Desenvolver os conceitos básicos de Termodinâmica como calor, trabalho, temperatura, energia, entropia e as Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica utilizando uma terminologia científica apropriada. Introduzir e desenvolver teoricamente conceitos abstratos ou discutidos de maneira insatisfatória nos livros didáticos como trabalho, calor, energia e entropia.

Recursos utilizados: Material didático, quadro branco, data show, entre outros que satisfaçam a realidade da escola do professor.

Tempo estimado: Pelo menos uma aula de 45 minutos.

Desenvolvimento: Esta aula pode ser iniciada com a entrega do questionário diagnóstico aos alunos. Em seguida problematizações estabelecidas com questionamentos sobre o que é calor e o seu uso inadequado no cotidiano, o que é temperatura e que tipo de informação esta propriedade física nos fornece, o que são máquinas térmicas e processos termodinâmicos e como estes podem ser reconhecidos no cotidiano dos estudantes, entre outros. Em seguida a formalização teórica destes conceitos pode ser feita do ponto de vista científico. A Primeira Lei da Termodinâmica pode ser introduzida para discutir o que é o princípio de conservação de energia, o conceito de energia de maneira geral, sua modalidade conhecida como energia interna e os métodos de transmissão de energia descritos pelo calor e pelo trabalho. A Segunda Lei da Termodinâmica pode ser discutida no contexto de máquinas térmicas, abordado inicialmente, e em seguida o conceito de entropia e o seu significado físico pode ser abordado.

Avaliação: O professor pode considerar como avaliação a participação dos estudantes durante o desenvolvimento da atividade e questionários dissertativos ou de múltipla escolha para a aplicação do conhecimento.

QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO

O professor pode elaborar o seu próprio questionário diagnóstico baseado em sua experiência e na realidade dos estudantes e da escola em que trabalha. Sugerimos algumas questões norteadoras para o desenvolvimento desta atividade, como:

- 1 – O que é temperatura?
- 2 – O que é calor?
- 3 – O que é trabalho?
- 4 – O que é energia?
- 5 – O que são máquinas térmicas?
- 6 – O que é entropia?

Estas questões foram sugeridas porque é muito comum os alunos estabelecerem concepções prévias sobre calor, temperatura e energia ou tratar os mesmos como sinônimos. A pergunta sobre trabalho é importante para fazer uma associação e diferenciação com o método de transmissão de energia dado pelo calor. Com relação as máquinas térmicas, a questão pode ser útil para entrar no tema sobre motores de combustão interna e pavimentar o caminho para a atividade 2, em que os conceitos de Termodinâmica são trabalhados com o auxílio do motor de quatro tempos real. É interessante introduzir o conceito de entropia já no início das atividades e discutir sobre o mesmo sempre que possível, para os estudantes adquirirem familiaridade com o mesmo para abstrair o seu significado físico em uma aplicação, pois este geralmente é tratado apenas matematicamente nos livros didáticos.

Seria interessante se o professor permitisse que os estudantes respondessem essas questões discursivamente, para que as respostas possam ser comparadas em um momento posterior às discussões estabelecidas com a utilização do motor real.

A.3.2 Atividade 2: Discussão dos conceitos de Termodinâmica com o uso do motor

Objetivos: Desenvolver os conceitos da Termodinâmica discutidos na atividade 1 em um contexto aplicado, com o uso do dispositivo tecnológico dado pelo motor de combustão interna. Dar ênfase no ciclo de trabalho de Otto ideal, o qual descreve o funcionamento do

motor utilizado, para fazer uma transposição direta do ciclo representado em um diagrama *PV* com o movimento do pistão em cada tempo do motor.

Recursos utilizados: Material didático, motor monocilíndrico de combustão interna adequadamente preparado como ferramenta didática, quadro branco, data show, entre outros que satisfaçam a realidade da escola do professor.

Tempo estimado: Pelo menos duas aulas de 45 minutos, de preferência geminadas.

Desenvolvimento: Esta atividade pode ser iniciada com um breve histórico sobre motores de combustão interna e como outros empreendimentos tecnológicos que ocorreram na época de seu surgimento, como a descoberta do petróleo bruto e a invenção do pneumático, contribuíram para estimular a ampla utilização desses motores do início do século XX até os dias atuais. Esta apresentação é interessante para introduzir o motor monocilíndrico de combustão interna preparado como ferramenta didática e justificar, de certa forma, a sua utilização para a discussão dos conceitos da Termodinâmica. Em seguida o professor pode introduzir a nomenclatura de todas as partes do motor e a função de cada componente no funcionamento do sistema para familiarizar os alunos com a tecnologia utilizada. Nesta parte é importante o professor demonstrar o funcionamento do motor e como este é simulado para explicar os seus quatro tempos de trabalho, utilizando uma manivela para movimentar o pistão e uma pequena lâmpada de LED para representar a centelha para a explosão da mistura ar-combustível na câmara de combustão.

Na sequência, o professor pode fazer as mesmas problematizações estabelecidas na atividade 1 para que os questionamentos sobre o que são calor, trabalho, temperatura, energia, máquinas térmicas, etc., sejam contemplados através do funcionamento do motor real. A expressão matemática da Primeira Lei da Termodinâmica pode ser apreciada através do funcionamento do motor em um ciclo de trabalho, para mostrar que a energia térmica proveniente da explosão da mistura ar-combustível é convertida em outras modalidades. Essa discussão pode ser útil para introduzir o que são processos termodinâmicos e a Segunda Lei da Termodinâmica, mostrando que a eficiência de uma máquina térmica não poder ser maior ou igual a 100%. Em seguida o ciclo de trabalho de Carnot pode ser apresentado em um diagrama *PV* no quadro branco ou através de *slides* para definir a eficiência máxima de uma máquina térmica reversível. O diagrama do ciclo de trabalho de Otto ideal pode ser discutido em seguida, mostrando cada processo do diagrama *PV* no movimento do pistão do motor. Durante tal exposição é interessante discutir as diferenças entre o ciclo de Otto ideal, que é fechado e tem como substância de trabalho um gás ideal como o ar, e o ciclo real de funcionamento do motor, o qual é aberto e tem como substância de trabalho a mistura ar-combustível e os gases

provenientes da combustão. Na sequência, o professor pode fazer um paralelo entre a taxa de compressão do motor real, a qual estabelece a razão entre o volume máximo e o volume mínimo da câmara de combustão, para calcular sua eficiência, com a razão entre as temperaturas absolutas da fonte fria e da fonte quente para calcular a eficiência máxima de uma máquina térmica, dada pela máquina de Carnot. Sugerimos que a abordagem do conceito de entropia com o motor real seja deixado por último para que este seja explorado e apreciado fisicamente após os estudantes terem adquirido familiaridade com a terminologia dos conceitos fundamentais da Termodinâmica e das partes do motor.

Durante a exposição dos conceitos, discussões para ampliar o conhecimento dos alunos podem ser conduzidas de maneira mais superficial, sobre o ciclo de trabalho de Diesel, diferentes combustíveis, motores híbridos, a importância de outras fontes de energia para a proteção do meio ambiente e outros conceitos da Física envolvidos na descrição do movimento do pistão e outras partes do motor.

Ao final da atividade o professor pode aplicar um segundo questionário para analisar a aplicação do conhecimento adquirido pelos estudantes com o auxílio do motor real. Este pode ser o mesmo questionário diagnóstico discursivo aplicado no início da atividade 1, para analisar a evolução dos alunos com relação aos conceitos abordados, ou um questionário de múltipla escolha.

Avaliação: O professor pode considerar como avaliação a participação dos estudantes durante o desenvolvimento da atividade e questionários dissertativos ou de múltipla escolha para a aplicação do conhecimento. Como sugestão adicional, o professor pode ainda propor atividades em grupo para que os alunos possam realizar investigações sobre os tópicos trabalhados com o uso do motor de combustão interna real.

A seguir sugerimos um questionário de múltipla escolha, contendo 10 questões e 5 opções de resposta, caso o professor queira utilizar em suas atividades. A resposta correta para cada questão está descrita em *itálico*.

QUESTIONÁRIO DE MÚLTIPLA ESCOLHA

1 - O que é Temperatura?

- a) É a energia que se transmite de um corpo a outro em virtude de uma diferença de temperatura.
- b) Uma grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõe um corpo, quanto mais agitadas as partículas de um corpo, menor será sua temperatura.
- c) Energia térmica em trânsito.
- d) É uma forma de calor.
- e) *Uma grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõe um corpo, quanto mais agitadas as partículas de um corpo, maior será sua temperatura.*

2 - O que é Calor?

- a) Trata-se de um sinônimo de temperatura em um sistema.
- b) É uma forma de energia contida nos sistemas.
- c) *É a forma ou o método pelo qual energia é transferida de um corpo a outro, devido à diferença de temperatura entre eles.*
- d) É uma forma de energia superabundante nos corpos quentes.
- e) É uma forma de energia em trânsito, do corpo mais frio para o mais quente.

3 - O que são máquinas térmicas?

- a) Todo tipo de dispositivo que trabalhando em ciclo possui 100% de eficiência.
- b) Todo e qualquer dispositivo que transforma energia mecânica em qualquer outra forma de energia.
- c) É todo dispositivo que consegue movimentar outro dispositivo.
- d) *É todo dispositivo que opera ciclicamente e transforma calor em trabalho.*
- e) É aquele que não necessita de fonte de calor para gerar trabalho.

4 - O que estabelece a Primeira Lei da Termodinâmica?

- a) *É o princípio de conservação de energia e estabelece que um sistema pode ser aquecido ou resfriado pela transferência de energia do sistema para a vizinhança ou da vizinhança para o sistema através de calor ou trabalho, ou ambos.*
- b) Esta estabelece que o calor diminui proporcionalmente à medida que o trabalho será realizado.
- c) Que uma grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõe um corpo, quanto mais agitadas as partículas de um corpo, menor será sua temperatura.
- d) Que é possível construir uma máquina térmica operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar energia através de calor de uma fonte e convertê-la integralmente em outra modalidade através de trabalho.
- e) Estabelece que as transformações gasosas que sempre ocorrem com uma das variáveis de estado de um determinado gás, irá se manter constante.

5 - Entre os mecanismos de transmissão de energia que existem, quais são os mais frequentes nas máquinas térmicas?

- a) *Condução e Convecção.*
- b) *Calefação e Dissolução.*
- c) *Dissolução e Condução.*
- d) *Radiação e Calefação.*
- e) *Convecção e Radiação.*

6 - O que é transformação adiabática?

- a) *É aquela em que não há trocas de energia através de calor entre o sistema e o meio exterior.*
- b) É a transformação gasosa em que a temperatura do sistema permanece constante.
- c) Ocorre quando uma massa fixa de determinado gás sofre variação no volume e na temperatura, mas a pressão mantém-se constante.
- d) Ocorre quando se mantém o volume constante e se variam a temperatura e a pressão de um gás com massa fixa.
- e) Transformações gasosas que sempre ocorrem sem manter nenhuma das variáveis de estado dos gases constante.

7 - Descreva o ciclo de Otto para um motor de combustão interna.

- a) O ciclo Otto é um ciclo de potência a vapor utilizado na análise de centrais termoelétricas.
- b) O ciclo ar padrão Otto é um ciclo de potência a gás que possui dois processos isoentrópicos e dois processos isotérmicos.
- c) O ciclo ideal de Otto é um ciclo de potência idealizado em que os processos de transferência de energia através de calor ocorrem de forma isentrópica.
- d) O ciclo ar padrão Otto é um ciclo ideal que considera que a adição de temperatura ocorre a volume constante.
- e) *O ciclo Otto é descrito por dois processos isobáricos, dois isovolumétricas e dois adiabáticos ou isoentrópicos.*

8 - Quais são os estágios de funcionamento de um motor a combustão interna de Ciclo Otto?

- a) Combustão, compressão, exaustão e admissão
- b) *Admissão, compressão, explosão e exaustão*
- c) Explosão, compressão, exaustão e escape
- d) Admissão, explosão, compressão e exaustão
- e) Combustão, admissão, compressão e descarga

9 - A Primeira Lei da Termodinâmica estabelece que se transferirmos uma determinada quantidade de energia para uma máquina térmica, esta será a quantidade de energia total da máquina. O que isso significa?

- a) Que uma máquina térmica consegue funcionar em ciclo infinito até que alguém a faça parar.
- b) Que é possível que uma máquina térmica produza mais trabalho do que a energia nela colocada, isto seria conhecido como super aproveitamento de energia.
- c) *Que é impossível retirar mais energia de uma máquina térmica do que aquela que foi disponibilizada para o seu funcionamento. Este é conhecido como o princípio da conservação de energia.*
- d) Que uma determinada máquina pode produzir energia espontaneamente, se transformando em um gerador de energia.
- e) Que todas as máquinas térmicas têm um ciclo de funcionamento que pré-determina o quanto de trabalho ela irá produzir independente da energia que ela receba.

10 - A Segunda Lei da Termodinâmica pode ser enunciada da seguinte forma: "É impossível construir uma máquina térmica operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar energia através de calor de uma fonte e convertê-la integralmente em outra modalidade através de trabalho." Esse princípio nos leva a concluir que:

- a) Sempre se pode construir máquinas térmicas cujo rendimento seja 100%.
- b) Qualquer máquina térmica necessita apenas de uma fonte quente.
- c) Calor e trabalho são grandezas homogêneas.

d) A energia útil de qualquer máquina térmica é sempre menor que a energia inserida na mesma, de maneira que nenhuma máquina térmica pode ter rendimento maior ou igual a 100%.
e) Somente com uma fonte fria mantida sempre a 0 °C é possível converter integralmente calor em trabalho em uma máquina térmica.

A.3.3 Atividade 3: Revisão das respostas dos questionários aplicados

Objetivos: Revisitar e discutir as respostas apresentadas pelos estudantes referentes aos questionários aplicados nas atividades 1 e 2, com o intuito de sanar dúvidas conceituais importantes que permaneceram durante a exposição dos conceitos com a utilização do motor de combustão interna.

Recursos utilizados: Material didático, motor monocilíndrico de combustão interna adequadamente preparado como ferramenta didática, quadro branco, data show, entre outros que satisfaçam a realidade da escola do professor.

Tempo estimado: Pelo menos uma aula de 45 minutos.

Desenvolvimento: Esta atividade pode ser iniciada com o professor apresentando de maneira geral algumas respostas inconsistentes relacionadas aos questionários aplicados. Tal inconsistência pode ser explorada através das respostas dos estudantes, caso os questionários sejam discursivos, ou através das respostas incorretas dos questionários de múltipla escolha. Este procedimento pode auxiliar a desenvolver a percepção dos estudantes com relação à resposta correta. Em todas as discussões é interessante o professor utilizar o motor de combustão interna real para complementar suas explicações e facilitar o entendimento dos estudantes sobre o que está sendo discutido.

Avaliação: O professor pode considerar como avaliação a participação dos estudantes durante o desenvolvimento da atividade.

A.3.4 Fechamento das atividades

Caso o professor queira saber a opinião dos estudantes sobre a aplicação da proposta, o professor pode fazer o fechamento das atividades através da aplicação de um questionário de opinião. A seguir sugerir um questionário deste tipo contendo 4 questões e 5 alternativas em uma escala Likert de 5 pontos, dada por (1) Excelente; (2) Ótimo; (3) Bom; (4) Regular; (5) Ruim. É importante que o professor solicite aos estudantes que justifiquem suas respostas, para dar melhor direcionamento em suas atividades e melhorar a proposta sempre que possível.

QUESTIONÁRIO DE OPINIÃO

1 – Você acha que a discussão de conceitos de Física com o uso de demonstrações experimentais facilita o entendimento do assunto abordado?

Excelente Ótimo Bom Regular Ruim

Por quê? Explique sua resposta.

2 – O que você achou da utilização do motor de combustão interna para a abordagem dos conceitos de Termodinâmica?

Excelente Ótimo Bom Regular Ruim

Descreva sua resposta detalhadamente.

3 – Com base nas aulas normalmente ministradas na escola, como você avaliaria os procedimentos utilizados?

Excelente Ótimo Bom Regular Ruim

Por quê? Explique sua resposta.

4 – O quão importante você acha que foram estas aulas para o seu aprendizado?

Excelente Ótimo Bom Regular Ruim

Por quê? Explique sua resposta.