

PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufst** 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

1. PREPARAÇÃO DO MOTOR DE QUATRO TEMPOS	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Breve histórico sobre o motor de combustão interna.....	12
2.2 A Termodinâmica e o Movimento Térmico	17
2.3 Definição de temperatura, calor, trabalho e energia.....	18
2.4 A Primeira Lei da Termodinâmica	21
2.5 Máquinas térmicas e a Segunda Lei da Termodinâmica	23
3. SEQUÊNCIA DIDÁTICA SUGERIDA	40
3.1 Atividade 1: Levantamento do conhecimento prévio dos estudantes	41
3.2 Atividade 2: Discussão dos conceitos de Termodinâmica com o uso do motor	42
3.3 Atividade 3: Revisão das respostas dos questionários aplicados.....	47
3.4 Fechamento das atividades	47
REFERÊNCIAS	49

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 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 2.

Figura 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 3 apresentamos a carcaça do motor limpa.

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

Figura 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 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 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 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.

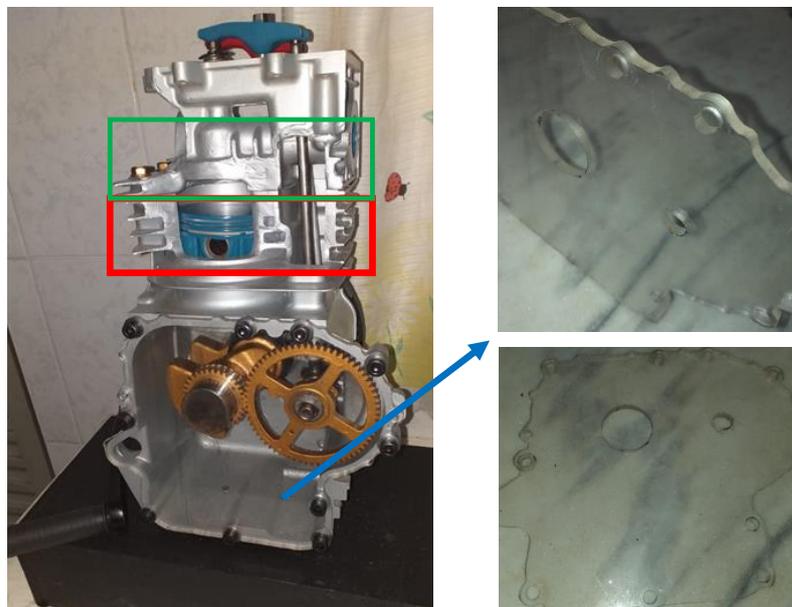


Fonte: Elaborado pelo autor.

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 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 5 mostramos que o corte feito na parte superior do cilindro (figura 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 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 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 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.

Figura 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 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 8 à esquerda.

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



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

8 à direita. Este parafuso fixa o volante contra peso situado na parte de trás do motor, como apresentado na figura 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 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 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 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 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.

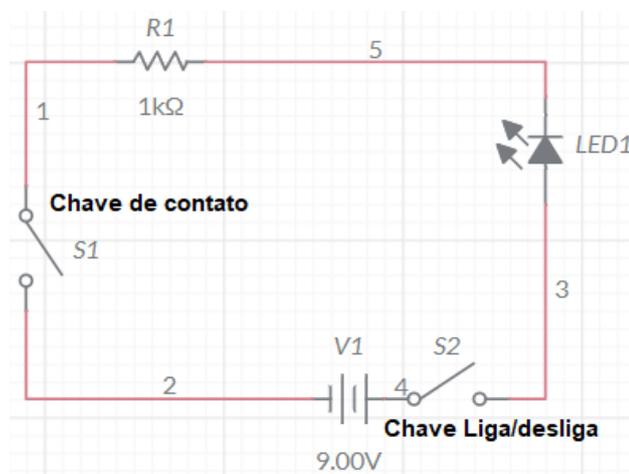
O motor que acabamos de apresentar é o principal componente do nosso produto educacional. Adicionalmente a esta montagem, preparamos uma sequência didática para mostrar como conceitos básicos de Termodinâmica, como temperatura, calor, trabalho, energia, entre outros, podem ser abordados a partir da utilização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

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



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 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.

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.

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.

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

Figura 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.

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.

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.

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:

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

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 (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 (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 (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 (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.

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.

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.

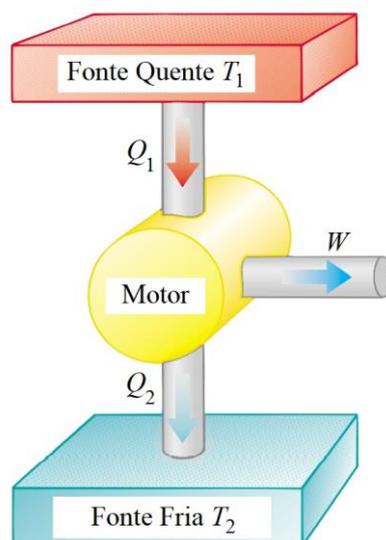
O processo politrópico geralmente não é explorado em livros didáticos do ensino básico, mas este pode ser introduzido através de exemplos conhecidos. Se considerarmos a equação da calorimetria, que relaciona a quantidade de energia Q que um sistema perde ou adquire através de calor com sua variação de 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 13 para mostrar como a Primeira e 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 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 (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 14 nos fornece:

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

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 (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),

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

Pela equação (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 (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 14.

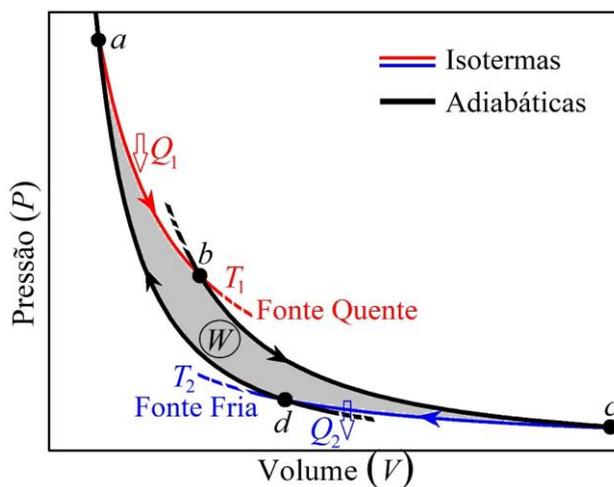
O motor térmico de Carnot opera entre duas fontes térmicas com temperaturas T_1 e T_2 , com $T_1 > T_2$. Ele assumiu que a substância de trabalho, equivalente à mistura ar-combustível no motor de combustão interna que utilizamos, é um gás ideal, cuja equação de estado térmica é dada por (HALLIDAY; RESNICK;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

$$PV = nRT, \tag{4}$$

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

Figura 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,,

$$PV^\gamma = k(S), \tag{5}$$

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 14.

Dessa forma, o ciclo de Carnot é iniciado com uma expansão isotérmica ab , veja figura 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 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 14 no interior do ciclo, ou seja,

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

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),

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

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

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

Com a expressão (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 (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%.

2.5.2 Entropia

A relação apresentada na equação (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) 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) e (8) obtemos,

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

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 (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 (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 (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*.

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 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 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 15. Este é o ciclo da maioria dos motores de automóveis.

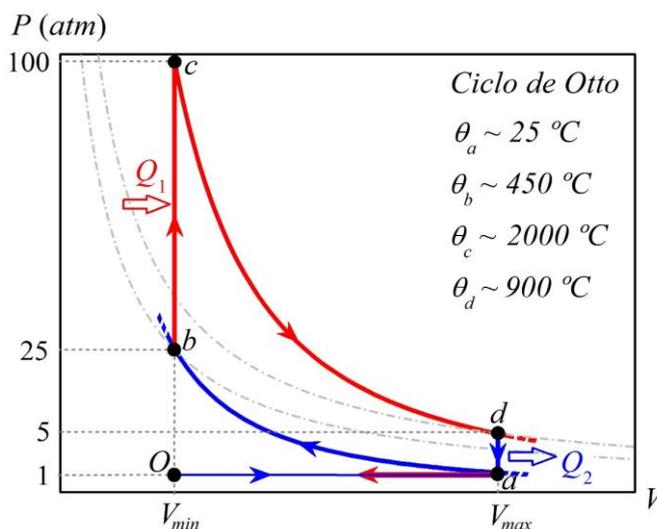
O ciclo do motor começa com o pistão na posição de volume mínimo (V_{min}), ou volume morto, da câmara de combustão, obtido com a altura máxima que o pistão alcança, também conhecido como Ponto Morto Superior (PMS) ou TDC, do inglês *Top-Dead-Center*. Nesta posição as válvulas de admissão e exaustão 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 15. Este é aproximado por um processo isobárico à pressão atmosférica de $1 atm$ e temperatura ambiente ($\theta_a \approx 25\text{ }^\circ C$). Para facilitar a visualização dos tempos do motor durante os processos termodinâmicos descritos na figura 15, apresentamos na figura 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 15. Neste processo há um aumento significativo da pressão e da temperatura da mistura, em torno de $25 atm$ e $450\text{ }^\circ C$ no ponto b , respectivamente. Este é seguido por uma compressão isovolumétrica bc no diagrama PV para representar o processo de combustão da mistura.

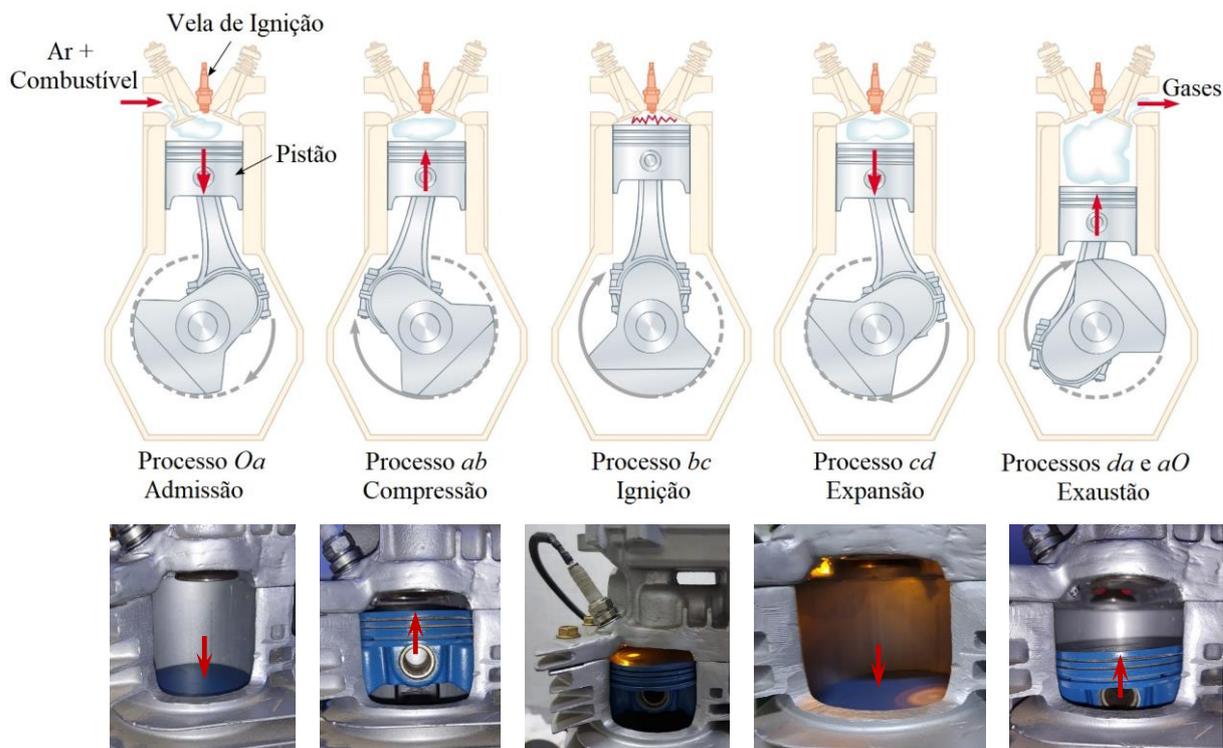
Durante a combustão a mistura adquire uma grande quantidade de energia através de calor, representada por Q_1 , fazendo com que os picos de pressão e temperatura do ciclo sejam atingidos no ponto c , em torno de $100 atm$ e $2.000\text{ }^\circ C$, respectivamente.

Figura 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 14.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 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 16.



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

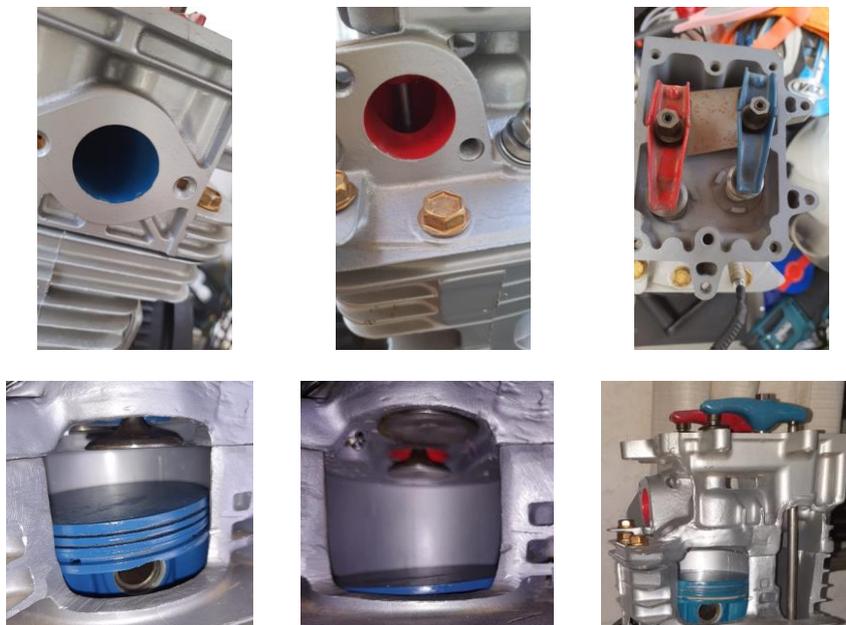
Este aumento significativo de energia no sistema com o pistão na posição PMS faz com que o *terceiro tempo* do motor seja iniciado. A alta pressão na câmara força o pistão a descer violentamente de volta para a posição PMI, conforme figura 16, convertendo parte da energia térmica Q_1 da combustão em 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 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 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 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 17.

No *quarto tempo* do motor o pistão é movido para cima com a válvula de exaustão aberta, veja figura 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 15.

Figura 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:

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

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 (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 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.

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.

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.

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 - 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 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.

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.

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.

REFERÊNCIAS

- BAZAROV, I. P. Thermodynamics. Translated by F. Immirzi. Pergamon Press: New York, 1964.
- 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.
- 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.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. Extended 8th Edition. Wiley, 2007.
- HEYWOOD, J. B. Internal combustion engines fundamentals. McGraw-Hill, Inc. 1988.
- 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.
- 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.