

TÉCNICAS DE ANÁLISES EXPERIMENTAIS DOS CICLOS MOTORES OTTO & DIESEL

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4214

Luiz Carlos Cordeiro Jr - luiz.cordeiro@fat.uerj.br
UERJ

Lays de Paula Maia - laysmaia20@hotmail.com
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Amyr Saraiva Marassi - amyr.saraiva.marassi@hotmail.com
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

João Pedro de Andrade Largura - joapedrolargura@hotmail.com
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Douglas Ximenes Marozzi Cirne - j.marozzi@hotmail.com
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo: *Os Ciclos Motores Otto & Diesel, embora em plena discussão para substituição por novas tecnologias com baixos níveis de emissões, continua sendo uma máquina térmica em equilíbrio. Este artigo, vem a contribuir com a formação acadêmica dos discentes, no curso de engenharia mecânica em relação as análises de rejeição térmica. Mesmo não dispondo de um dinamômetro, a proposta foi desenvolver a partir da mistura estequiométrica, o balanço de geração e consumo de energia. Desta forma, foi necessário adequar estes motores para bancadas didáticas, tornando deste modo, possível o desenvolvimento de técnicas na análise de dados em conjunto com o embasamento termodinâmico teórico.*

Palavras-chave: *ciclos motores, bancada de motores, rejeição térmica*

TÉCNICAS DE ANÁLISES EXPERIMENTAIS DOS CICLOS OTTO E DIESEL

1 INTRODUÇÃO

Este artigo busca contribuir no ensino complementar em diversas disciplinas associadas a fenômenos de transporte, através do uso de motores vivos (funcionais) dos ciclos Otto & Diesel, com atividades que serão apresentadas no decorrer deste trabalho.

Em universidades de engenharia, o estudo na área de motores está cada vez mais direcionado para as metodologias ativas de aprendizagem, capacitando o aluno a conciliar todo o embasamento teórico junto as atividades experimentais, visto na grande maioria serem máquinas térmicas em perfeito equilíbrio térmico é possível tornar a atividade motivadora e desafiadora, como defendida por Matos (et .al,2004).

No desenvolvimento deste conteúdo, será possível observar que mesmo não dispondo de uma bancada dinamométrica, e outros recursos mais complexos de análise, é possível desenvolver diversas atividades teórico-experimentais, construindo conteúdos com conceitos simples e otimizados, estimulando os discentes nas diversas oportunidades de coleta e análise dos dados.

Todo este conceito, faz parte do atual material utilizado nas disciplinas de “Máquinas Térmicas e de Fluxo” e em “Fenômenos de Transporte Experimental” do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Campus Resende. Para a construção desta atividade, foram transformados em bancadas acadêmicas dentro do Laboratório de Motores, um quadro de chassi veicular equipado com motor Diesel ISBe III, de 250 cv, fabricante Cummins e um veículo Nissan March, com motorização 1.6L, ambos os motores foram instrumentados com termopares, e receberam adaptações para aquisição e registro de temperaturas e diferencial de pressão, protocolos de segurança adicionais foram implementados a fim de garantir a execução das atividades junto aos discentes.

2 CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES E ATIVIDADES

Para início das atividades, é importante que o discente adquira conhecimento sobre o comportamento teórico dos Ciclos Diesel & Otto, assim como as relações termodinâmicas teóricas (isentrópicas) e também o conhecimento das partes construtivas que compõe cada motor e as aplicações e ou funções durante o funcionamento. Para melhor construir esta trilha do conhecimento, a proposta é dividida nas seguintes atividades:

- **Aprendizagem teórica:** desenvolvido em sala de aula. São abordadas revisões termodinâmicas e de fenômenos de transporte em material apostilado, com objetivo de que o discente seja estimulado a pensar na modelagem analítica dos ciclos e desenvolver arranjos básicos por intermédio de atividades complementares.
- **Aprendizagem experimental:** atividades experimentais. Os alunos são estimulados a utilizar ferramentas e a desmontar e montar motores dos ciclos Otto e Diesel, compreendendo a função dos diversos componentes que garantem o funcionamento dos mesmos;

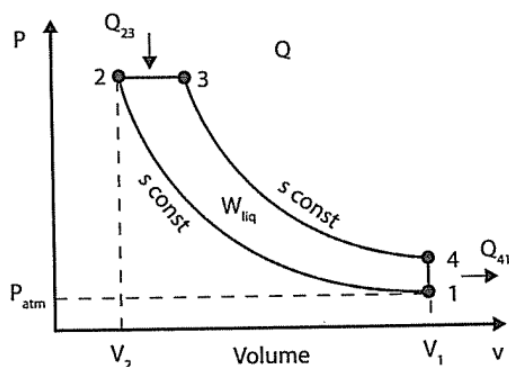
- **Registro do mapa térmico:** atividade teórica e experimental. Os alunos são estimulados a desenvolver a análise completa de rejeição térmica dos motores, após definido a condição de teste é realizado o monitoramento térmico destes motores até que estabilize o regime permanente. Nesta etapa, os alunos cientes dos objetivos e responsabilidades, iniciam o desenvolvimento das análises e utilizam como material de apoio resultados dinamométricos publicados pelos fabricantes dos motores que possibilita conciliar grande parte do estudo.

2.1 Conceito Teórico

No Ciclo Diesel, figura 1, o calor é transferido ao fluido de trabalho a pressão constante. Esse processo corresponde à injeção e queima do combustível no motor Diesel real. Como o gás se expande durante a transferência de calor no ciclo padrão a ar, a transferência de calor deve ser apenas suficiente para manter a pressão constante. Quando se atinge o estado 3, a transferência de calor cessa e o gás sofre uma expansão isotrópica (processo 3-4) até que o pistão atinja o ponto morto inferior (PMI). A rejeição de calor, como no ciclo padrão Otto, ocorre a volume constante e com o pistão no ponto morto inferior. (VAN WYLEN et al., 2013, p.440)

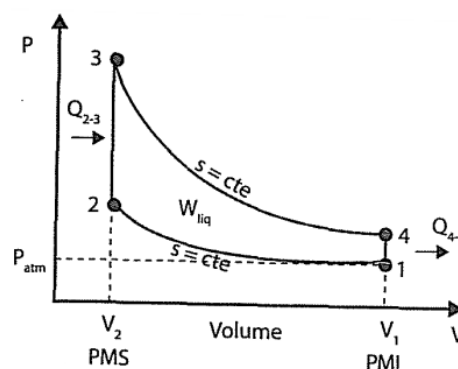
Já o motor de Ciclo Otto, figura 2, é um motor de combustão interna, que aproveita a energia proveniente da queima de combustível nos cilindros e possui alto rendimento energético. No Ciclo Otto de 4 tempos, o processo tem início quando a válvula de admissão se abre, permitindo a entrada da mistura ar/combustível admitida pela câmara de combustão (1-2 Compressão adiabática), na segunda etapa a válvula de admissão se fecha e o pistão sobe comprimindo a mistura (2-3 Combustão isocórica). Na terceira etapa, com o pistão, no final da compressão, a vela de ignição libera uma faísca provocando a explosão da mistura e empurrando o cilindro para baixo (3-4 Expansão adiabática), por último, a válvula de escape é aberta para que o gás quente resultante da queima seja repellido da câmara de combustão, resfriando o sistema (4-1 Exaustão isocórica). Após a saída do gás quente, o pistão sobe para diminuir o volume na câmara de combustão, encaminhando o gás restante para fora do motor. Todo este conteúdo, é apresentado com viés termodinâmico, através das relações politrópicas entre os pontos característicos de cada ciclo.

Figura 1 Diagrama P-V Ciclo Diesel



Fonte: BRUNETTI, 2016

Figura 2 - Diagrama P-V Ciclo Otto



Fonte: BRUNETTI, 2016

As aulas teóricas sobre os Ciclos Motores, quando conciliadas com as atividades experimentais, promovem nos alunos o uso de conceitos prévios para explicar novos fatos (Matos - 2004), o que corresponde a primeira fase da mudança conceitual, chamada de assimilação. Porém, estes conceitos são inadequados para explicar com êxito o novo fenômeno. Então o estudante deve substituir e reorganizar os seus conceitos centrais, a que se chama de acomodação de novos conceitos, no processo de aprendizagem. Estas habilidades torna o discente apto a realizar todo o estudo experimental e com melhores competências para exercer a função de engenheiro em atividades futuras.

2.2 Conceito Experimental

Desenvolvidos os conteúdos teóricos de cada ciclo motor, os discentes são estimulados as aulas experimentais, com auxílio de material apostilado e com um expositor exibindo os componentes dos motores, auxiliando os discentes ao pleno entendimento. Após esses conhecimentos, os alunos são estimulados a desmontar e montar os motores, os quais podem ser vistos na figura 3, entendendo a função de cada componente frente ao funcionamento destes nas máquinas térmicas. Estas atividades, são extremamente importantes na contribuição da formação acadêmica dos alunos e na formação das habilidades comportamentais, estimulando a autoconfiança dos discentes na construção da proposta pedagógica.

Figura 3- Motores de Ciclos Otto e Diesel utilizados para desmontagem e montagem.



Fonte: Os autores

Após realizado todos os ensaios estáticos, os discentes são preparados para conduzir as atividades dinâmica/funcional. Inicialmente, para evitar riscos de segurança pessoal e ou de material, são apresentadas as áreas de riscos em ambos os motores como superfícies quentes e peças em movimento. As vestimentas precisam ser rigorosamente apropriadas, sendo proibido acessórios e roupas não adequados para este tipo de atividade. A primeira bancada didática, é a do ciclo Diesel, representado por um motor Cummins ISBe 250cv, utilizando Diesel S10 (Figura 4) e a outra de Ciclo Otto (Figura 5) que é caracterizada através do veículo Nissan March 1.6 SL, com motorização HR16, utilizando gasolina aditivada. Ambas as bancadas têm o sistema de exaustão dos gases direcionados para o ambiente externo do Laboratório de Motores, Hidráulica e Pneumática (Lab. MHP), localizado na Faculdade de Tecnologia (FAT) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Campus de Resende.

Figura 4 - Motor Ciclo Diesel.



Fonte: Os Autores.

Figura 5 - Motor Ciclo Otto.



Fonte: Os Autores.

Para transformar estes motores em bancadas didáticas, foram necessárias algumas modificações como:

Ciclo Diesel:

- Na ventoinha de arrefecimento do motor, foi realizado um “jumper”, para que a vazão mássica de ar atinja a máxima condição;
- A válvula termostática do circuito de arrefecimento foi removida. Deste modo o circuito atende a maior condição de vazão imposta pela bomba d’água;
- No pedal do acelerador foi adaptado para uma trava mecânica, garantindo ao potenciômetro uma abertura e velocidade padronizada;
- O tanque de combustível foi substituído por um reservatório menor, possível de controle da quantidade de massa de combustível utilizada para cada análise por intermédio de uma balança eletrônica;
- No circuito de arrefecimento de água foi inserido um “by pass”, possibilitando a instalação de um tubo de Venturi, para controle da vazão do liquido de arrefecimento e posterior cálculos térmicos;
- Termopares de tipo K, com proteção de PVC foram instalados em diversas interfaces do motor, inclusive na parte interna.

Ciclo Otto:

- Ações similares ao Ciclo Diesel foram realizadas, exceto a questão do tanque de combustível. Devido ao risco de acidentes, e do baixo ponto de fulgor da gasolina, foram administrados dados de consumo do fabricante;

Estas modificações foram possíveis devido a prévio conhecimento experimental do Coordenador do Lab.MHP, e devido o apoio também recebido das Empresas Nissan e Volkswagen Caminhões e Ônibus. Por fim, embora criticado por muitos, o uso de atividades experimentais sempre mobiliza custos e recursos, (Pavani, et al – 2019), porém continua sendo a melhor proposta na fixação de conteúdo.

2.2.1 Registro do Mapa Térmico

Desenvolvidos os conceitos teóricos e experimentais, o corpo discente é preparado para as atividades do registro e monitoramento de temperatura, vazão de água e gases do sistema de exaustão e a pressão nos circuitos de arrefecimento dos motores. Dentre os equipamentos utilizados, destacam-se termopares e o sistema de aquisição de dados, manômetros de pressão e anemômetros. A utilização de todos os equipamentos e somados as técnicas de trabalho, estimula o aprendizado e aproxima os alunos da realidade profissional praticada por empresas e instituições.

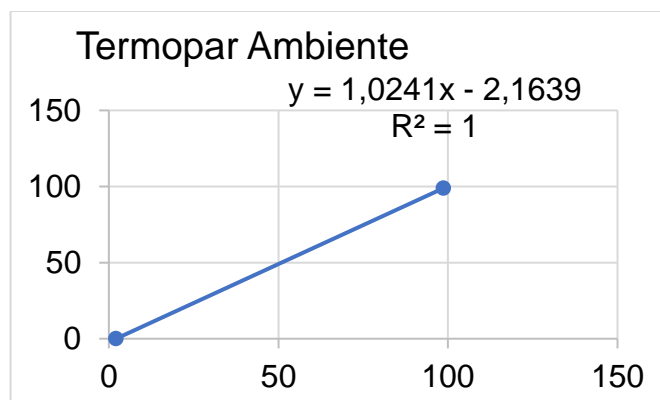
Neste mapeamento térmico, os discentes são estimulados a entender as técnicas para leitura e interpretação das informações, detalhes associados a qualidade de preparação dos termopares e na própria formatação do equipamento de aquisição de dados. Um processo que sintetiza por meio da prática o que a literatura expõe, através de uma enorme gama de afirmações teóricas sobre o assunto e que em muitas universidades o discente não tem a oportunidade de colocar em prática todo o conhecimento teórico obtido em sala de aula.

A instrumentação industrial é a área da engenharia voltada para os processos industriais, nas leituras e medições das variáveis físicas e químicas que compõem um sistema. O intuito é controlar essas variáveis, a fim de melhorar e desenvolver, otimizando o processo (Dunn, 2013).

Um dos equipamentos de maior importância nesse experimento é o termopar, preparado por meio da união de dois fios metálicos distintos conectados em uma das extremidades, onde é gerado uma força eletromotriz, que quando é conectado a um instrumento de leitura, neste caso, a placa de aquisição de dados, é possível ler a temperatura da mesma devido ao diferencial de tensão. O termopar utilizado foi do tipo K, formado por ligas de Cromel (Ni 90% e Cr 10%) e Alumel (Ni 95,4%; Mn 1,8%; Si 1,6; Al 1,2%), em temperaturas variáveis entre 0°C a 1260°C, logo, para obter resultados mais confiáveis, é necessário calibrá-lo a fim de que não haja divergências nos cálculos termodinâmicos.

Um bom elemento para a calibração do termopar é a água destilada, a qual foi utilizada no presente trabalho com base em suas temperaturas de fusão e ebulição. Foram realizadas 10 aquisições de suas temperaturas em intervalos de 1 minuto. Após esse procedimento, foi determinado a curva de calibração de cada termopar. Um exemplo do método para obter a equação da reta que resulta na calibragem correta do mesmo pode ser visto na figura 6.

Figura 6- Curva de Calibração do termopar Ambiente



Fonte: Os Autores.

Para realizar o balanço térmico foi necessário instrumentar os motores Diesel e Otto com termopares tipo K nos seguintes pontos estratégicos: admissão de ar do motor, ar ambiente, bloco do motor interno e externo, mangueira de entrada e saída no radiador de água, mangueira de entrada e saída (para o Ciclo Diesel) no radiador de ar, corpo da turbina (Ciclo Diesel) e sistema de exaustão.

Para início da aquisição de dados, foi utilizada uma rotação específica para cada motor, e o registro das temperaturas foi realizado em intervalos de tempos de 5 minutos, até que o motor entre em regime permanente, uma vez que os motores não estão sob fator de carga, o período até entrar em regime permanente é rápido. Durante a aquisição, além da aferição de temperatura, é efetuada uma análise no radiador de água por meio do tubo de Venturi instalado na mangueira de saída do radiador, o qual pode ser visto pelas figuras 7 e 8, em que através de uma constrição é capaz de identificar a vazão do fluido que escoar pelo mesmo, por meio da diferença de pressão, e assim, determinar a rejeição de calor do radiador de água. Em paralelo, é realizado o aferimento da velocidade do ar de admissão e dos gases no escapamento, utilizando um anemômetro para determinar a vazão mássica dos gases de combustão.

Figura 7- Tubo de Venturi no Ciclo Otto



Fonte: Os Autores.

Figura 8 – Tubo de Venturi no Ciclo Diesel



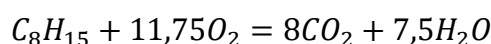
Fonte: Os Autores.

Na sequência dos estudos, para Ciclo Diesel foi adaptado um reservatório externo aferido por uma balança eletrônica, a fim de que seja possível determinar a quantidade de massa de combustível consumida durante o ciclo de testes e a energia inserida no sistema para posterior balanço energético. No Ciclo Otto este mapeamento não pode ser realizado devido ao risco da alta volatilidade do carburante e também da segurança, portanto, foram utilizados dados do consumo de combustível fornecidos através de um relatório dinamométrico, de massa específica da gasolina e do seu poder calorífico para os mesmos objetivos de cálculos.

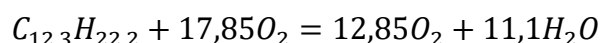
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para dar início aos cálculos teóricos, foram determinados o calor específico de cada combustível para ser utilizado no balanço energético através da equação do equilíbrio químico. Sabendo que é realizada a mistura do mesmo com oxigênio, o resultante são os produtos de combustão, água e gás carbônico, sempre utilizando excesso de ar na mistura para não gerar gases nobres.

Equilíbrio químico para a combustão da gasolina:



Equilíbrio químico para a combustão do Light Diesel:



Com base nos produtos de combustão utilizando o equilíbrio químico, a massa molar de cada combustível e o ar de combustão, foi determinado o percentual volumétrico dos componentes em base úmida e transformados em percentual mássico para que seja possível estabelecer o calor específico dos combustíveis utilizando a entalpia de cada gás e a temperatura de entrada e de saída dos produtos da queima.

Definidos os calores específicos, a próxima etapa é realizar os cálculos termodinâmicos através das relações politrópicas utilizando como base as temperaturas obtidas dos termopares, o poder calorífico inferior dos combustíveis, o peso específico e a vazão mássica de combustível por meio de dados obtidos na literatura, para calcular a temperatura, pressão e volume específico em cada tempo dos motores.

Posteriormente, é calculada a rejeição térmica de cada motor, iniciando pelo radiador de água, por intermédio das diferenças de pressões marcadas nos manômetros e dos diâmetros nas tubulações do "Venturi" utilizados, foi determinada a velocidade e a vazão do fluido que escoar no radiador. Para o cálculo do desempenho do radiador, foram utilizadas as temperaturas de entrada e saída do mesmo, o calor específico da água na pressão de saturação e a vazão mássica.

Para determinar a energia rejeitada pelo bloco do motor, foi considerado o mapeamento térmico por meio das temperaturas das faces internas e externas do motor e as dimensões do mesmo, para determinar as propriedades térmica da temperatura da

mistura e conseqüentemente o coeficiente global de transferência de calor e utilizá-lo na equação de energia.

Por fim, para calcular a rejeição térmica dos gases de escape, foi aferida a velocidade dos gases de exaustão por meio de um anemômetro no bocal de escape, e em seguida determinada a potência de dissipação de calor dos gases de exaustão do motor.

A metodologia de ensino descrita acima é aplicada na aula de fenômenos de transporte experimental e resulta na energia bruta e rejeitada pelos motores. Com os resultados, o objetivo do desenvolvimento desse trabalho é atingido, o qual é obter as eficiências dos motores para determinada rotação. Com os efeitos dos cálculos térmicos, foi realizado um balanço energético para definir o trabalho líquido e posteriormente encontrar a eficiência de tal motor, por meio do mapeamento térmico, conforme a equação a seguir:

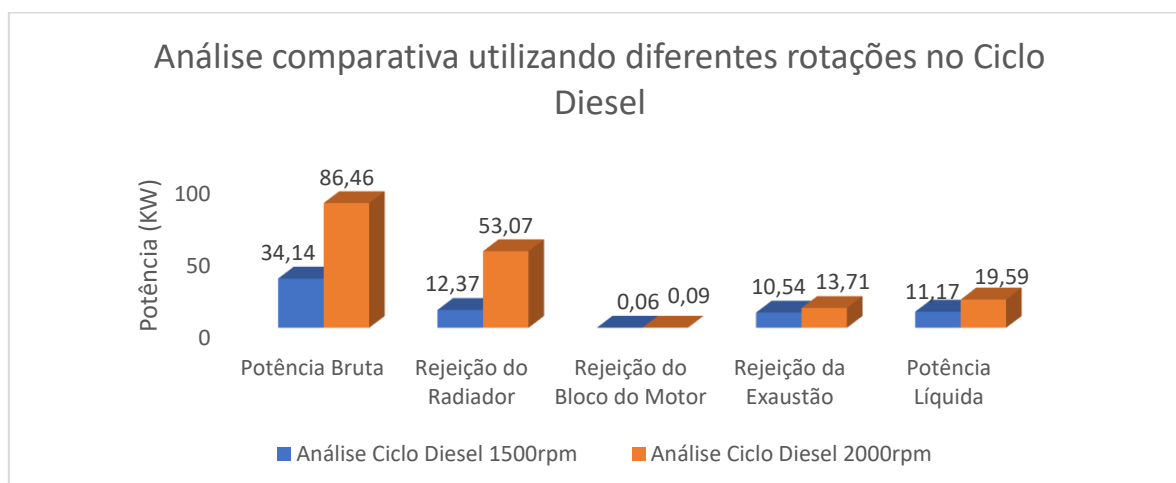
$$P_{liq} = P_{bruta} - P_{rejeitada}$$

Onde a potência bruta é toda a energia que o motor produz durante seu trabalho, e a potência rejeitada é toda energia perdida durante o experimento, sendo dividida entre o bloco do motor, radiador de água e para os gases de exaustão. A equação acima se expande como:

$$P_{liq} = P_{bruta} - P_{bloco\ do\ motor} - P_{radiador} - P_{gases\ de\ exaustão}$$

Os resultados obtidos nas análises são satisfatórios, mesmo não dispondo de dinamômetros, os valores encontrados das rejeições térmicas, com base nas condições comparativas das curvas de torque e potência dos motores variaram em torno de 15% a 20%, sem levar em considerações outros fatores recorrentes aos protocolos de testes destes motores e propriedades específicas dos fluidos que são considerados. Como as curvas dinamométricas são dados protegidos por propriedade intelectual dos fabricantes, impede que os mesmos sejam compartilhados neste conteúdo de forma comparativa.

Figura 9 – Potências do Motor no Ciclo Diesel a 1500rpm e 2000rpm



Fonte: Os Autores.

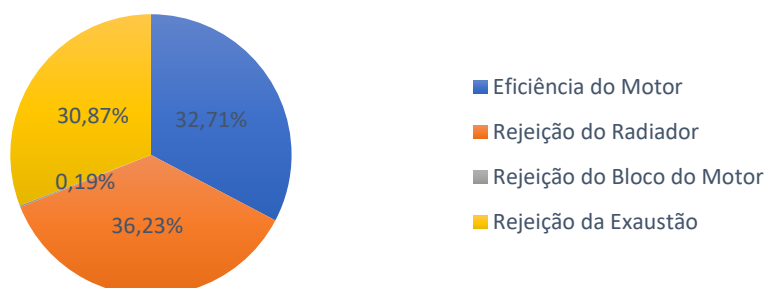
Por fim, foi encontrada a eficiência dos motores através da equação:

$$\eta = \frac{P_{liq}}{P_{bruto}}$$

Para o ciclo Diesel, as potências determinadas em 1500rpm e 2000rpm podem ser vistas nas figuras 10 e 11. Logo, é perceptível que a eficiência do motor condiz com a realidade, variando próximo de 20% a 35%.

Figura 10 – Percentual das Potências do Motor no Ciclo Diesel a 1500rpm

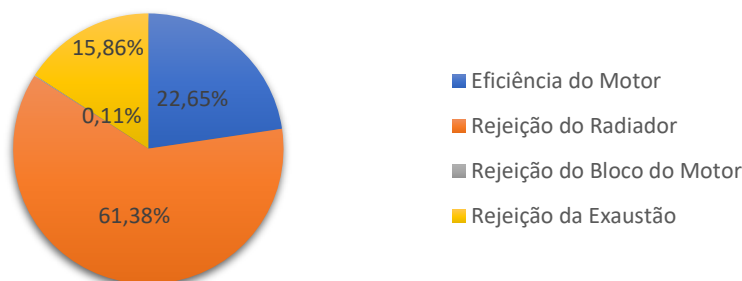
Comparativo das Potências no Ciclo Diesel a 1500rpm



Fonte: Os Autores.

Figura 11 – Percentual das Potências do Motor no Ciclo Diesel a 2000rpm

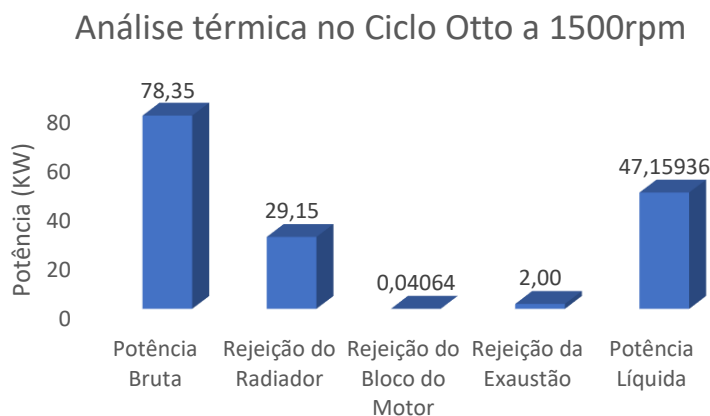
Comparativo das Potências no Ciclo Diesel a 2000rpm



Fonte: Os Autores.

Para o Ciclo Otto, foi realizado uma análise a 1500rpm em que os resultados obtidos podem ser observados a seguir:

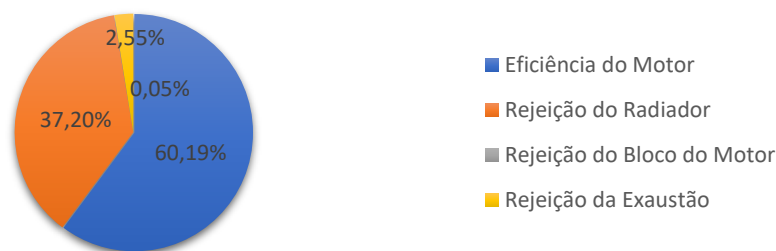
Figura 12 – Potências do Motor no Ciclo Otto a 1500rpm



Fonte: Os Autores.

Figura 13- Percentual das Potências do Motor no Ciclo Otto a 1500rpm

Comparativo das Potências no Ciclo Otto a 1500rpm



Fonte: Os Autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É notório em diversas universidades que o aluno de engenharia não tem a possibilidade de determinar a eficiência de um motor Otto ou Diesel, utilizando o método experimental, devido à ausência de dinamômetro entre outros equipamentos de alto custo de investimento, entretanto este artigo busca compartilhar alternativas para que se desenvolvam propostas e conteúdos através do balanço de energia, potência do ciclo e, por fim, a eficiência térmica, seja do ciclo Otto ou do Ciclo Diesel. Neste trabalho, todo o balanço térmico foi desenvolvido e comparado com resultados oficiais, o que estimula os discentes quanto a aplicação dos conceitos, a compactação das informações fundamentadas em dados reais por meio de equipamentos de baixo custo, como

termopares, anemômetro e tubulações para aferir a vazão que escoar pelo radiador (Venturi), estimulando o discente de aplicar o conhecimento técnico adquirido durante o curso de engenharia.

Os cálculos teóricos foram obtidos através de uma modelagem isentrópica no Ciclo Otto e Ciclo Diesel, os dados obtidos estão próximos da realidade, por mais que tenham sido utilizadas as análises termodinâmicas para inícios dos cálculos, mesmo sabendo que o processo é irreversível e que existe uma grande interface do meio externo em cada parte do processo do ciclo.

A utilização de um laboratório preparado com equipamentos necessários para toda a análise, mesmo que de baixo custo, contribui fortemente para o fomento à pesquisa e desenvolvimento desse estudo, além de contribuir para o ganho de conhecimento técnico para os futuros engenheiros mecânicos. Desse modo, esta nova metodologia de ensino vem sendo aplicada e aprimorada a cada período da FAT-UERJ com êxito. Este tipo de método possibilita o contato direto dos alunos do curso de engenharia com motores vivos, o qual proporciona a aplicação dos conhecimentos obtidos em sala de aula sobre máquinas térmicas, além de possibilitar atividades de integração dos alunos e promover a qualidade de ensino da Universidade, em especial para a Faculdade de Tecnologia da UERJ, instituição onde fora realizada esse estudo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. 1 ed. Vol. 1. São Paulo: Blucher, 2014

Dunn, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos**. Bookman Editora, 2013.

HENN, Érico Antônio Lopes, **Máquinas de Fluido**. 2ª edição. Santa Maria: ED. da UFSM, 2006.

INCROPERA, F.P., Dewitt D.P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, LTC 7ª Edição, 2014

Matos, Regina M. Jorge; CASELLA, Esleide Lopes; GOUVÊA, Míriam Tvrzská de. **A importância da realização de experimentos para a construção de conceitos na formação de um engenheiro autônomo**. XXXII CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 32, 2004, Brasília, DF.

PAVANI, Sergio Adalberto; POZZER, Cezar Tadeu; COLUSSO, Paulo Roberto. **Bancada virtual para laboratórios de automação pneumática, hidráulica, acionamento de motores e controladores de processo - um caso em evolução**. Revista de Ensino de Engenharia, v.1,ISS2236-0158. Disponível em: <http://revista.educacao.ws/revista/index.php/abenge/article/view/1755/961>. Acesso em: 19abr. 2023

VAN WYLEN, G. J.; Sonntag, R. E. e Borgnakke, C., **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 8ª Edição Americana, E.J. Zerbini, São Paulo: Editora Edigard Blucher Ltda, 2013.

Experimental Analysis Techniques Of Otto and Diesel Engine Cycles.

Abstract: The Otto and Diesel Engine Cycles, although in full discussion for replacement by new technologies with low emission levels, continue to be a thermal machine in equilibrium. This article contributes to the academic training of students in the mechanical engineering course in relation to thermal rejection analyses. Even without a dynamometer, the proposal was to develop, from the stoichiometric mixture, the balance of energy generation and consumption. In this way, it was necessary to adapt these engines to didactic benches, thus making it possible to develop techniques in data analysis in conjunction with the theoretical thermodynamic basis.

Keywords: engine cycles, engine bench, thermal rejection