

# FATORES INFLUENTES DAS IRREVERSIBILIDADES DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

GONÇALVES, Sergio Ewerton dos Santos <sup>1</sup>

FLORÊNCIO, Deivyson Costa <sup>2</sup>

CAMPO, Eduardo Rafael Barreda (Orientador) <sup>3</sup>

CRUZ, Ricardo Wilson Aguiar (Co-Orientador)<sup>4</sup>

## RESUMO

Nos motores de combustão interna, muitos fatores contribuem para aumentar a diferença entre o rendimento real e o valor do rendimento máximo teórico, ou do rendimento do ciclo Otto ou Diesel. As irreversibilidades afastam os processos reais dos processos ideais e estes últimos servem de comparação quando se quer mitigar as fontes de irreversibilidades, procurando melhorias na eficiência dessas máquinas térmicas. Este trabalho expõe as principais fontes de irreversibilidades que se manifestam nos diferentes sistemas que compõem o motor de combustão interna, fazendo com que sua eficiência seja relativamente baixa.

**Palavras-chave:** motores de combustão interna, gases de exaustão, lubrificação.

## ABSTRACT

Many factors contribute to increase the difference between the actual efficiency and the maximum theoretical efficiency of the internal combustion engines, when compared to the efficiency of the Otto cycle or the Diesel cycle. Irreversibilities drive away the real processes from the ideal processes, and the latter serve as a comparison when one wants to mitigate the sources of irreversibilities, looking for improvements in the efficiency of these thermal machines. This work exposes the main sources of irreversibilities that are manifested in the different systems that make up the internal combustion engine, making its efficiency relatively low.

**Keywords:** Internal combustion engines, exhaust gases, lubrication.

---

<sup>1</sup> Graduando em engenharia mecânica na Universidade Uninorte – E-mail: engme@outlook.com

<sup>2</sup> Graduando em engenharia mecânica na Universidade Uninorte – E-mail: deivysoncosta@hotmail.com

<sup>3</sup> Pós doutorado em térmica e fluidos na Universidade UNICAMP – Email: eduardoserapio@yahoo.com.br

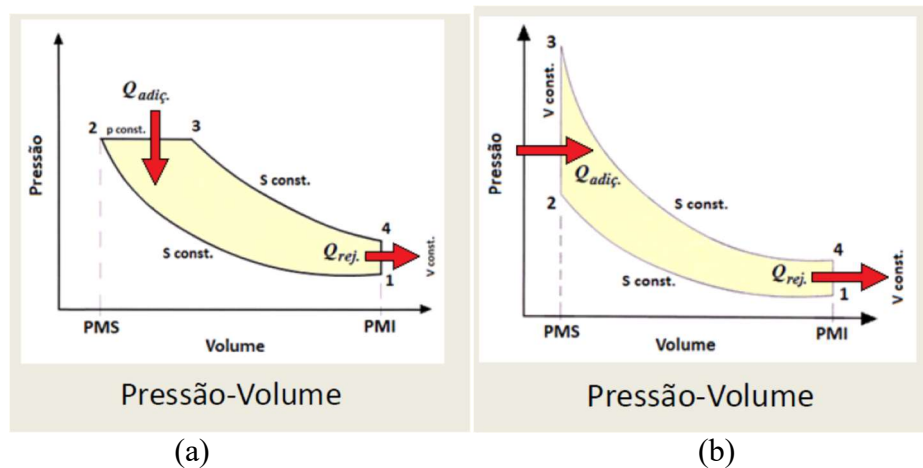
<sup>4</sup> Pós doutorado em Engenharia Térmica na universidade Zaragoza – E-mail: rwcruz@gmail

## 1. INTRODUÇÃO

A pesquisa de motores foi desenvolvida ao longo dos anos e continua a ser um campo desafiador que oferece grandes oportunidades. Isto é justificado pela alta dependência da sociedade em motores de combustão interna para o transporte (em diferentes modos, por exemplo, rodoviário, ferroviário, marítimo e aéreo), comércio e produção de energia. Devido à diversidade de suas aplicações, mesmo pequenas melhorias em sua eficiência representam um impacto considerável, seja na economia ou no meio ambiente (BARGER, CARLETON, McKIBBEN, 1966).

Os principais desafios relacionados ao desenvolvimento de motores de combustão interna são a redução das emissões de poluentes e o consumo de combustível (INTERNATIONAL ENGINES, 2001). Existem várias propostas na literatura para este propósito, por exemplo: sistema de injeção de combustível de alta pressão, injeção múltipla, alta pressão, recirculação de gás de escape (EGR), controle variável de válvula, altas taxas de fluxo e mais combustível. Dada a diversidade de oportunidades e a necessidade de alcançar resultados no setor automotivo em pouco tempo, a modelagem é uma excelente ferramenta que fornece resultados confiáveis, economizando tempo e dinheiro. A simulação não elimina a necessidade de testar ou montar um protótipo, mas pode reduzir o número de testes, o que se traduz em custos menores.

Figura 1. Diagrama PV para o ciclo teórico a ar de motores de combustão interna de ciclo Diesel (a) e ciclo Otto (b).



Fonte: Notas de aula de motores de combustão interna (Cruz, 2017).

## 2. MOTORES

O motor é uma máquina projetada para converter qualquer energia térmica, elétrica, hidráulica, química ou outra energia em energia mecânica. Motores de combustão interna convertem a energia térmica da combustão ou combustão do combustível em energia mecânica.

Distinguimos aqui os dois principais tipos de motores, operando de acordo com a aspiração da mistura ar-combustível (ciclo Otto), promovendo então a combustão queimando a mistura através de uma faísca, e motores aspirando apenas ar e, logo após a compressão, o combustível que promove a combustão rápida é pulverizado devido a alta temperatura e pressão gerados pela compressão do ar de sucção (ciclo Diesel).

desde seus inícios estas máquinas vem sendo aplicadas fundamentalmente no setor automobilístico, aéreo e naval de pequeno porte e geração de energia elétrica. No caso específico do Estado do Amazonas esta máquina térmica tem um papel fundamental na geração de potencia elétrica, sendo nosso estado o de maior parque termo energético do país.

## **2.1 Motores de combustão interna**

O processo de conversão ocorre através de ciclos térmicos que envolvem, quando de quatro tempos, aspiração, compressão, expansão e escape com as respectivas mudanças de temperatura e pressão da substancia de trabalho em cada uns destes processos.

Motores de combustão interna são aqueles que usam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Ou seja, são os gases que executam os processos de compressão, aumento de temperatura (combustão), expansão ou força e finalmente exaustão.

Assim, este tipo de motor difere dos ciclos de combustão externos, nos quais os processos de combustão ocorrem fora da máquina térmica, por exemplo, o motor Stirling e as turbinas a vapor. Neste caso, os gases de combustão transferem o calor no gerador de vapor para um segundo fluido de trabalho (água).

O motor baseado no ciclo Otto ideal é caracterizado pela ignição motivada por centelha. Este tipo é mais comumente usado em carros de passageiros e motocicletas. Motores a Diesel são caracterizados por ignição por compressão. O fluido de trabalho (geralmente ar) é comprimido sem ser misturado com o combustível e, quando este é injetado no cilindro, onde encontra o ar comprimido a alta temperatura e pressão, se inflama.

Motores que acionam veículos pesados, tais como, caminhões, trens e navios são baseadas no ciclo Diesel.

## **2.2 Características técnicas dos motores de combustão interna**

As características, ou os dados técnicos, dos motores de combustão interna são predeterminados na concepção dos motores, principalmente aqueles que diferenciam um determinado fabricante de outro.

Os motores, como qualquer máquina, se desgastam com o tempo e o uso, com falhas devido a esse processo. No caso de motores de combustão interna, eles podem ter defeitos devido ao desgaste durante a operação, falta de manutenção ou reparos inadequados.

## **2.3 Sistema de arrefecimento automotivo**

O calor que provém do processo da combustão que não foi aproveitado para a geração de potência é rejeitado, em regime permanente, para os gases de exaustão, para o sistema de arrefecimento e para o óleo lubrificante. Devido a restrições de ordem metalúrgica, as partes metálicas do motor podem sofrer danos, fazendo-se imprescindível a previsão de um apropriado resfriamento das mesmas. (COONEY, WORM, NABER, 2009). Assim, um sistema de arrefecimento é usado para manter condições térmicas estáveis nos componentes, nas condições de operação (COONEY, WORM, NABER, 2009.)

Há, basicamente, três razões que justificam a existência de um sistema de arrefecimento no motor:

1. Promover uma elevada eficiência volumétrica minimizando o fluxo de calor da estrutura do motor para o ar de ingresso;
2. Prevenir a detonação devido a elevadas temperaturas na câmara de combustão;
3. Evitar falhas mecânicas nos materiais devido às elevadas cargas térmicas que provêm de gradientes térmicos excessivos. (ASLAM, 2005, p. 77)

Descreve-se, a seguir, o funcionamento e os componentes mais importantes de um sistema de arrefecimento automotivo.

### **2.3.1 Componentes e funcionamento de um sistema de arrefecimento automotivo**

Existem dois tipos de sistemas de arrefecimento automotivo: sistemas de arrefecimento por água e por ar. Os sistemas que fazem uso da água podem ser abertos ou fechados, sendo estes últimos os que correspondem ao presente estudo.

O sistema de arrefecimento automotivo a água é formado pelos seguintes componentes principais:

1. Passagens de fluido no bloco de cilindros ou jaqueta do motor.
2. Radiador.
3. Bomba do líquido de arrefecimento.
4. Termostato.

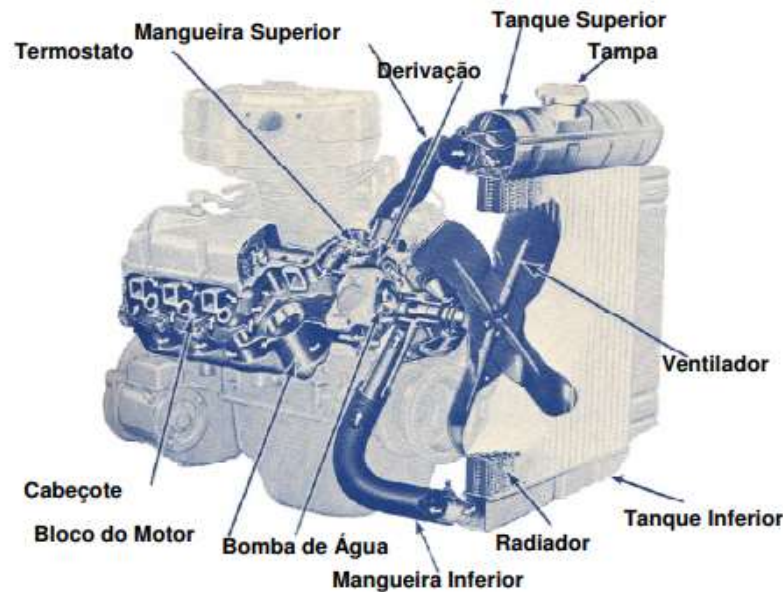
Além destes componentes, também fazem parte do mesmo o ventilador e as mangueiras de conexão. A Figura 2 mostra um esquema do circuito do sistema de arrefecimento automotivo com as partes mencionadas.

O funcionamento do sistema de arrefecimento pode ser descrito da seguinte maneira:

1. O FDA (Fluido de Arrefecimento) é bombeado desde a parte inferior do radiador e forçado a circular ao redor das paredes e do cabeçote.
2. Depois de trocar calor com o bloco de cilindros, o FDA circula através da mangueira superior do radiador e chega até o tanque superior.
3. O FDA é resfriado pelo ar que atravessa a colmeia do radiador e desce até a mangueira inferior do radiador.
4. Finalmente, o FDA a baixa temperatura circula da mangueira inferior à bomba para começar um novo ciclo.

Embora seja desejável retirar a maior quantidade de calor residual das partes do motor, com o propósito de melhorar a sua eficiência volumétrica, um excesso de resfriamento pode provocar uma inconveniente mistura de óleo e combustível não vaporizado. Portanto, somente uma faixa apropriada de temperaturas pode permitir resultados satisfatórios à operação do motor.

Figura 1 – Vista seccionada de um motor V-8, mostrando o sistema de arrefecimento. As setas brancas indicam o fluxo do FDA através da camisa do motor



Fonte: (Adaptado de Mahle,2007 )

Quando o FDA é água, a faixa de temperatura usual está entre 75 °C e 90 °C, com o objetivo de evitar a vaporização do fluido. Com o uso de misturas água – etileno glicol essa faixa de temperaturas pode facilmente superar os 100 °C. Para sistemas pressurizados estes valores são superiores.

### 2.3.2O calor no sistema de arrefecimento

Uma descrição detalhada da distribuição da energia no motor a combustão interna é apresentada por Bosch (2010), mostrando a transformação da energia química do combustível nos diferentes processos de transferência de calor e de realização de trabalho.

Somente uma parte do total da energia da combustão é transferida diretamente ao eixo. Aproximadamente 75% da energia do combustível são perdidos, sendo os restantes aproveitados na forma de trabalho (Bosch. 2010).

### 2.3.3Fontes de irreversibilidades no sistema de arrefecimento do motor de combustão interna.

As principais fontes de irreversibilidades presente no sistema de arrefecimento de um motor de combustão interna são as perdas de calor e atrito ocasionado pelo escoamento do fluido de arrefecimento dentro da galeria do motor fundamentalmente no bloco do motor e em motores de grande porte a mesma chega ao bloco do motor, para ter nesta zona uma temperatura adequada.

A perda de calor como irreversibilidade esta associado a seu próprio conceito, pois sua existência denota aquela parcela de energia disponibilizada na combustão e que não foi convertida em potencia mecânica, embora é necessária retirar do interior do motor para melhorar sue desempenho e proteger o motor do superaquecimento o qual provocaria danos na resistência térmica do material do motor, esta parcela de calor pode chegar a ser de 26% a 30% da energia disponibilizada na combustão(Cruz,2018). Este

calor retirado do motor, o fluido refrigerante o rejeita ao meio mediante a troca de calor com o ar ambiente no radiador do carro fundamentalmente mediante o mecanismo de convecção forçada, sendo a válvula termostática a encarrega de regular o acionamento da ventoinha quando a temperatura do fluido refrigerante esta acima do valor permitido e o carro esta sem movimento. Esta parcela de calor retirada com o fluido de arrefecimento se torna cada vez mais significativa em função da potencia do motor, chegando a ser sensível de ser utilizada em motores estacionários de grande porte quando aplicada a tecnologia de efficientização "cogeração" visando aumentar a eficiência global do sistema no qual forma parte o motor de combustão interna, uma destas aplicações, por exemplo, pode ser o uso deste fluido refrigerante a alta temperatura aquecer água para ser utilizada em limpeza, higienização e mesmo sistema de produção de baixas temperaturas.

Outra fonte de irreversibilidade neste sistema é o atrito ocasionado pelo escoamento do fluido refrigerante através das galerias do motor, este atrito ocasiona uma resistência de escoamento que se traduz num aumento da carga da bomba do sistema de arrefecimento, que por sua vez é acionada pelo motor de combustão interna o que faz com este direcione parte da potencia produzida total para o acionamento desta, e refletindo-se em uma diminuição da potencia total produzida no motor, fazendo com que a potencia líquida disponível no motor seja menor.

### **3.SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.**

Um motor de combustão interna é desenvolvido para funcionar por centenas e até milhares de quilômetros. Para que isso seja possível, o motor é provido de um sistema de lubrificação, caso contrário não duraria alguns minutos. Isso aconteceria devido o movimento incessante de peças dentro do motor, sendo que estas peças estão em contato com outras peças de mesmo ou semelhante material. O sistema de lubrificação garante que essas peças trabalhem com um filme de óleo entre elas(atrito úmido), que reduz consideravelmente o atrito e conseqüentemente o desgaste. Além disso, o sistema também exerce uma função refrigerante auxiliar ao sistema de arrefecimento, retém partículas em suspensão no óleo que venham a alcançar os canais de lubrificação sobre intenso trabalho das peças de força, previne a oxidação das peças e a formação da carbonização.

O sistema de lubrificação deve prover lubrificação para os seguintes componentes:

- Mancais da(s) árvore(s) de cames;
- Mancais da árvore de manivelas;
- Paredes do cilindro;
- Cabeça do pistão;
- Pé da biela com pino do pistão;

As peças dos motores de combustão interna estão muito longe de serem perfeitamente lisas e uniformes. Pelo contrario, a nível microscópico, estão cheias de rugosidades, que ao estar em contato com outras peças geram um grande atrito, a não ser pela ação do óleo. O óleo forma uma película entre as duas peças, preenchendo as rugosidades existentes entre elas. A formação dessa película pode ser prejudicada pela pressão exercida pelas peças em contato, podendo levar ao desaparecimento desta película e então o contato metal-metal será inevitável. A formação da película de óleo até o seu desaparecimento (contato metal-metal) é caracterizado por três níveis de atrito, a saber:

Atrito líquido: a película de óleo está íntegra e não permite o contato das peças entre si.

Atrito Úmido: A película de óleo começa a se desgastar, permitindo em alguns pontos o contato na saída do pistão e o cilindro.

Atrito Seco: O filme de óleo foi completamente retirado da parede do cilindro, deixando o motor exposto ao prejudicial contato pistão-cilindro.

Nos motores, de forma geral, existem diferentes tipos de lubrificação, entre as quais podemos citar:

- Sistema de Lubrificação por salpico;
- Sistema de Lubrificação por pressão;
- Sistema de Lubrificação por projeção;
- Sistema de Lubrificação por mistura;
- Sistema de Lubrificação por cárter seco.

### **3.1 Funcionamento do sistema de lubrificação de um motor de combustão interna.**

Ao dar partida no motor, a força deste também faz girar a bomba de óleo, que está acoplada diretamente ao virabrequim, através de uma correia (motores antigos, caso em que a bomba é externa) ou por engrenagem (motores modernos, caso em que a bomba é interna). A bomba fornece óleo pressurizado por todos os canais de lubrificação existentes no motor. Os canais de lubrificação direcionam o óleo para os mancais da árvore de manivelas e do eixo do comando de válvulas, e, caso possua eixo de balancins, também a este. A lubrificação é tão crítica quando importante, pois quando o eixo gira as moléculas do óleo também giram e sugam o óleo da canalização para o mancal, conforme a velocidade do eixo cresce, a sucção de óleo também cresce. Então ocorre o fenômeno da cunha de óleo, que é quando em torno do eixo forma-se uma zona de maior pressão, que empurra ou afasta o eixo do mancal e assim o eixo gira sobre a película de óleo que se forma (Mahle, 2007). Embora isto garanta a lubrificação de peças móveis, as paredes dos cilindros possuem lubrificação garantida pelo salpico ou projeção de óleo sobre estas, seja qual for o tipo de sistema de lubrificação. Isso ocorre devido à deficiência de lubrificação nos primeiros minutos de funcionamento do motor. Dentro de todo esse trabalho, o óleo fornece a capacidade de lubrificação e refrigeração das peças internas do motor, podendo atingir altas temperaturas cujos limites estarão definidos pelas especificações e tipos de óleos lubrificantes, sejam minerais ou sintéticos. No cárter, geralmente a temperatura do óleo é de aproximadamente 80°C. Dependendo do projeto do motor, pode ser necessária a montagem de um radiador de óleo para melhor refrigeração do lubrificante, e geralmente isto acontece em motores de grande porte estacionários.

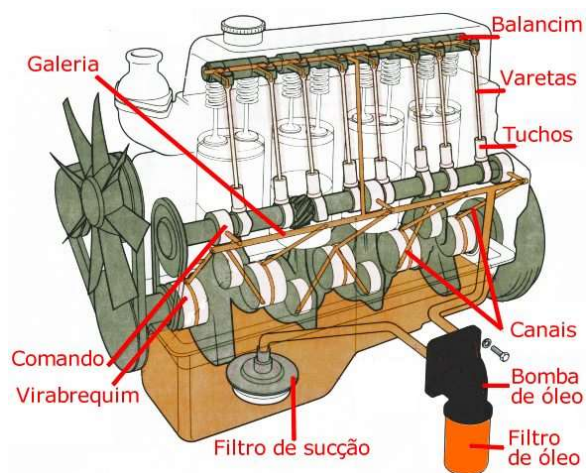
#### **3.1.2 Componentes do sistema de lubrificação:**

O sistema de lubrificação é constituído pelos seguintes componentes:

- Bomba;
- Filtro de óleo;
- Pescador de óleo;
- Cárter;
- Radiador de óleo;
- Vareta do nível do óleo;

- Óleo.

Figura 3 Sistema de Lubrificação de um Motor de Combustão Interna



Fonte. Adaptada de Bosch,2010

No sistema de lubrificação dos motores de combustão interna, é necessário que a cada certo número de quilômetros rodados pelo veículo, ou número de horas de funcionamento para motores estacionário, realizar a troca do óleo lubrificante e do filtro de óleo(Martin,2008).Prolongar esta substituição além do tempo estabelecido pelo fabricante do motor coloca em risco a vida útil do motor, já que durante o tempo de funcionamento do motor o óleo se vai contaminando com impurezas, fundamentalmente carbono, combustível, matérias betuminosas e partículas metálicas. No caso do filtro, uma vez utilizado não pode ser reutilizado.O uso contínuo de um filtro de óleo no sistema de lubrificação comprometerá toda a eficiência do sistema, mesmo que o óleo seja novo, pois ao invés de manter o sistema limpo, ele irá contaminar o óleo novo,com possibilidade de ocorrer calço hidráulico, pois cerca de 300 ml de óleo sujo fica retido no filtro (Reis et. al, 2005).

### 3.2 Fontes de irreversibilidades no sistema de lubrificação do motor de combustão interna.

Como pode se deduzir da descrição e funcionamento deste sistema, sua principal função é mitigar uma das mais importantes fontes de irreversibilidades que é o atrito, que no caso do motor de combustão interna, além de conduzir a um maior consumo de potência por parte do motor, quando esta se manifesta, leva ao risco da perda do próprio equipamento.Para diminuir esta possibilidade, em pontos estratégicos, tais como o mancal de deslizamento, é colocado uma lâmina de material de sacrifício feito com uma liga macia, tipicamente à base de cobre, chamada rotineiramente de bronzina, para que, se chegar a falhar a lubrificação, este material se desgaste e não se destrua o material do eixo, diminuindo os custos de manutenção. Neste sistema existe uma fonte de atrito no próprio sistema de escoamento do lubrificante através dos canais de lubrificação, sendo necessário uma determinada pressão da bomba de lubrificação para atingir todos os pontos essenciais e necessários a serem lubrificados, para manter a película de óleo íntegra e garantir o correto funcionamento do motor.



Outra das funções deste sistema também está relacionada com o "resfriamento" das partes quentes do motor que ele banha,disso resultando aumento de temperatura do lubrificante, consistindo esta perda de calor ao óleo lubrificante numa parcela do calor disponibilizado pela queima do combustível que não se converteu em potência. Deve-se salientar que o acionamento da bomba de lubrificação provém do consumo de parte da potência produzida pelo motor, o que leva a uma redução da potência total gerada nesse equipamento.

## **4. SISTEMA DE COMBUSTÃO NOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.**

### **4.1 Cronologia dos Alimentadores de Motores de Combustão Interna.**

#### **4.1.1 Motores de Ignição por Centelha.**

- A primeira tecnologia usada foi o carburador, que promovia a mistura ar-combustível por ação da depressão do ar admitido em um estrangulamento (Venturi). Apesar de ter concepção simples, o carburador não consegue promover correta relação ar-combustível em todas as faixas de rotações e cargas de um motor de uso veicular. Não é este o caso de motores de uso estacionário de pequeno porte (até 40 cv), que normalmente operam com, pelo menos, rotação constante (mesmo que sob alguma variação de carga), e daí porque esses motores continuam usando o carburador, que tem custo de construção e manutenção muito baixos(Aslam.et.al,2005);
- A segunda e atual tecnologia de alimentação dos motores de centelha, tanto de uso veicular como estacionário de grande porte (motores que usam gás combustível), foi a injeção no coletor de admissão, nos primórdios feita por apenas um bico injetor; e depois por dois ou mais bicos injetores (a mistura ar-combustível entra premixada no cilindro)(Payri.et al, 2011). Maior o número de bicos, maior o motor. Esta tecnologia surgiu junto com a adoção da eletrônica e de microprocessadores para o gerenciamento de diversas funções de controle dos motores, notadamente da dosagem ar-combustível que, com isso, tornou-se melhor do que com os carburadores. Uma variante da injeção com bicos no coletor é a injeção direta no cilindro, caso em que o motor não recebe a mistura premixada, mas opera quase como os motores de ignição por compressão,os quais comprimem ar isolado e o combustível é injetado no fim da compressão do ar. Diferentemente, nos motores de centelha, o combustível é injetado nos momentos iniciais da compressão. Porém, injeção direta nos motores de centelha só é usada em motores de alto desempenho (motores para competição). A injeção de combustível associada com o controle eletrônico (por isso, alguns denominam este sistema de “injeção eletrônica”) permite melhor dosagem ar-combustível em várias cargas e rotações, mas, quanto a aplicação veicular, tem como limitação a exigência de que o sistema eletrônico, que consiste dos microprocessadores com memória (EPROM), tenha gravado previamente todas as possíveis combinações de carga e rotação que porventura o motor vá ser submetido, o que de fato é impossível de prever (afinal, o uso de um motor veicular está sujeito a situações aleatórias). Este também não é o caso dos motores de aplicação estacionária, nos quais carga e rotação são previsíveis. Essas imprevisibilidades são responsáveis pelas ainda existentes ineficiências de

alimentação da injeção de combustível em motores veiculares. Mitigá-las demanda custos de engenharia de desenvolvimento que, em veículos mais populares, não são suportáveis pelos consumidores comuns.

#### **4.1.2 Motores de Ignição por Compressão.**

Sempre adotaram a injeção de combustível, feita diretamente no cilindro, ao fim da compressão do ar; ou indiretamente, adotando uma pré câmara de combustão. A injeção direta é usada em motores de queima mais lenta (portanto de baixa a média rotação), enquanto a indireta em motores mais rápidos (modernos motores de centelha da Honda e da Toyota estão adotando esta tecnologia também). A injeção preliminar na pré câmara de combustão permite que os motores de compressão operem com queima muito próxima do limite estequiométrico, o que favorece a eficiência da combustão. Além de permitir elevar a rotação dos motores de compressão, uma vantagem adicional da injeção indireta é que esta permite o uso de queima conjunta gás (80%)-gasóleo (20%), nos chamados motores de queima dual, de uso em geração elétrica. Quanto ao uso veicular, a grande fonte de ineficiência da alimentação por injeção em motores de compressão está no fato de que, contrariamente aos motores de centelha, esses motores operam com admissão de ar totalmente aberta, portanto sob vazão total de ar, o que os obriga a razões ar-combustível em descompasso com a carga de operação (Reitz, R., 2013). Em outras palavras, como a maioria dos motores de compressão não adotam controle eletrônico, a injeção de combustível é mecânica e sincronizada pela rotação e não pela carga. Assim, nos usos veiculares, a queima de combustão torna-se ruim nas variações de carga do motor, o que se externaliza pela emissão de fuligem típica desses motores. Este não é o caso dos motores de compressão de uso estacionário, cujas variações de carga são lentas e a rotação é constante.

### **5. SISTEMA DE EXAUSTÃO.**

O sistema de gases de exaustão começa na abertura da válvula de escape do cilindro, onde os gases gerados pela combustão, depois de realizar trabalho, são expelidos para a atmosfera. Estes gases se encontram dentro do cilindro a alta temperatura e pressão. A abertura da válvula de escape acontece de forma brusca, o que de fato torna a exaustão um processo altamente entrópico, traduzindo-se em alta irreversibilidade. O sistema de válvulas acionado pelo comando de válvula é um sistema que consome energia, pois este sistema é movimentado mecânica e diretamente pelo motor, possui molas que exercem resistência à sua abertura e fechamento, daí que consome energia do total convertido no motor.

O sistema de exaustão é o encarregado pela expulsão dos gases fora do cilindro o que impõe uma das maiores perdas de calor ao motor de combustão interna, parcela que pode chegar, em média, a 25% da energia disponibilizada pelo combustível. Em motores estacionários de grande porte, pode-se diminuir o impacto desta perda buscando alguma utilidade para a energia contida nos gases, como acontece nos sistemas de cogeração, onde a energia dos gases de exaustão podem servir para produzir

uma utilidade, quer seja como energia térmica ou produção de baixas temperaturas em sistema de refrigeração por absorção, aumentando de fato a eficiência do sistema .

O próprio escoamento desses gases de exaustão para fora do cilindro, promovido inicialmente pela alta pressão em que eles se encontram, e depois pela ação do êmbolo ao percorrer o cilindro desde o ponto morto inferior ao ponto morto superior, implica em irreversibilidades, no caso, associadas aos atritos de escoamento. Ademais, nem toda a massa desses gases sai do cilindro, senão a maior parte, ficando uma pequena parte retida no chamado volume de espaço morto do cilindro (região de cima do cilindro, localizada no cabeçote). Essa pequena fração, que se chamade “gases residuais”, contribui para a ineficiência da combustão, uma vez que interage com a carga fresca de cada ciclo do motor. O mesmo ocorre quando o motor é dotado de válvula VCR, que reinjeta gases queimados no cilindro no intuito de diminuir a formação de  $\text{NO}_x$  nos gases de exaustão, neste caso, constituindo-se em um contribuinte à ineficiência imposto por regulamento ambiental.

No caminho desses gases de exaustão para atmosfera, ainda no coletor de exaustão, existem dois elementos que contribuem para aumentar as perdas, que formam parte das irreversibilidades junto com o atrito do escoamento dos gases, que são o catalisador e o silenciador (abafador). Neste último, sua irreversibilidade é mais notória, pois a expansão dos gases nesse dispositivo, visando diminuir o nível de ruído, provoca uma perda de carga local e decorrente maior resistência para a saída dos gases.

De forma geral, este sistema gera irreversibilidades associadas ao atrito, produto do escoamento dos gases de exaustão e às resistências locais ao passarem pelo catalisador e pelo silenciador, e que vem a ser as mais significativas perdas associadas ao processo de abertura da válvula de escape e à parcela de calor (energia) jogada fora com os gases de exaustão, energia essa que não foi transformada em trabalho e, como comentado, pode alcançar, em média, 25% da energia disponibilizada pela queima do combustível.

## **6. DISSIPACÃO DE CALOR MEDIANTE OS DIFERENTES MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.**

Uma parcela da energia gerada na combustão no interior do motor se perde, mediante os diferentes mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), como constatado durante as abordagens feitas nos diferentes sistemas do motor de combustão interna. Nesta máquina, temos diferentes fluidos trocando calor, elementos submetidos a altas temperaturas, todos devido à alta energia gerada durante o processo de combustão e que termina de uma forma sendo dissipada ao meio ambiente. Alguns autores afirmam que, em média, 6,5% da energia da combustão se perdem em forma de energia radiante, pelas paredes do motor ao exterior, parcela que contribui às irreversibilidades já estudadas e contribui a que o motor térmico seja menos eficiente.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram abordadas as fontes de irreversibilidades notoriamente presentes em cada um dos principais sistemas do motor de combustão interna, e que, como irreversibilidades, tem uma influência marcante na diminuição do rendimento térmico dessas máquinas.

As principais fontes de irreversibilidades estão associadas ao atrito existente entre as partes móveis do motor, o que é minimizado quando o sistema de lubrificação se comporta de forma eficiente e assegura a formação da película de óleo nas partes lubrificadas do sistema.

A outra, e não menos importante, irreversibilidade presente no sistema está associada às perdas de calor, energia essa que não é transformada em potência, e que se converte em perdas nos diferentes sistemas que compõem o motor, como o sistema de arrefecimento que garante a temperatura adequada para o funcionamento, sem deixar que esta seja uma temperatura excessivamente alta que comprometa a resistência térmica da estrutura metálica do motor (bloco do motor), ou uma temperatura inferior que comprometa a estrutura e a contração dos materiais, assim como os processos térmicos de combustão. As perdas de calor também ocorrem ao sistema de lubrificação, cujas características dos óleos lubrificantes restringem os máximos valores de temperaturas que estes podem atingir para garantir a viscosidade necessária para a adequada lubrificação. Porém, o aumento da temperatura do óleo denota a presença dessa perda de energia térmica da combustão. Igualmente acontece com os gases de exaustão, cuja perda térmica é a parcela mais significativa, não só por seu volume mas também pelo nível de temperatura desses gases, o que torna esta parcela a mais significativa, desde o ponto de vista de perda de calor, sendo importante salientar que a mesma torna-se significativa em motores estacionários de grande porte e que permite seu aproveitamento como energia térmica, ou mesmo para produção de baixas temperaturas associadas a sistemas de absorção, quando utilizado a tecnologia de cogeração.

As irreversibilidades associadas ao processo de combustão são dadas pela variabilidade estocástica das misturas do combustível e o comburente. A extração do máximo valor energético dessa reação química é influenciada por essa mistura ar-combustível, que, nos motores de combustão interna são extremamente variadas.

Finalmente, as perdas de calor do motor enquanto um volume de controle global, associadas aos mecanismos de transferência de calor, dentre as quais a convecção e depois a radiação térmica são majoritárias, pois o mecanismo da condução é mais interno, são fonte considerável de irreversibilidade. Já foi tentado a redução dessas irreversibilidades globais pela construção de motores com materiais refratários (cerâmicos, vítreos, etc.) os quais foram denominados de “motores adiabáticos”, mas esta solução até hoje ainda está em desenvolvimento, quer pelo alto custo, quer pela baixa disponibilidade desses materiais.

Pode-se inferir que a tendência futura destes motores térmicos se restringirá fundamentalmente ao transporte de carga rodoviário, propulsão naval de várias categorias e geração termelétrica, devido às restrições ambientais aos produtos das emissões gasosas contaminantes, relegando o mercado automobilístico urbano à propulsão elétrica, solar, células a hidrogênio, ou mesmo, se algum motor de combustão interna ainda sobreviver neste segmento, ao uso de hidrogênio, ou também, por híbridos destas tecnologias.

## 8. REFERÊNCIAS

ASLAM, M.U., et. al. *An Experimental Investigation of CNG as an Alternative Fuel for a Retrofitted Gasoline Vehicle*. Fuel (2005).

BARGER E. L.; LILJEDAHN, J. B.; CARLETON, W. M.; McKIBBEN, E. G. *Tratores e seus motores*. 1. ed. Rio de Janeiro: USAID, 1966.

BOSCH, R. *Manual de tecnologia automotiva*. 25ª. Ed. Tradução de HelgaMadjiderey et al. São Paulo: Ed. EdgardBlücher, 2010.

COONEY, C. P., WORM, J. J., NABER, J. D. *Combustion Characterization in an Internal Combustion Engine with Ethanol-Gasoline Blended Fuels Varying Compression Ratios and Ignition Timing*. Energy & Fuels, 2009.

CRUZ, Ricardo W. "Notas de aula de motores de combustão Interna". 2017, Universidade do Estado do Amazonas.

GALLO, W.L.R. *Análise Exergética de Motores a Gasolina e a Álcool*. 1990. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

INTERNATIONAL ENGINES. *Especificações técnicas – motor modelo HS 2.5 T*. Impresso. 2001.

MAHLE. *Driven by performance*. Apostila Treinamento. 2007.

MARTIN, J. *Motores de combustão interna*. Université Catholique de Louvain. UCL. TERM., 2008.

MORAN, J.M e SHAPIRO, H.N. *Fundamentos da Engenharia Termodinâmica*, 5ª. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2002.

PAYRI, F., Olmeda, P., Martín, J., García, A. *A complete 0D thermodynamic predictive model for direct injection diesel engines*. Applied Energy, 88 (2011), pp. 4632-4641.

REITZ, R. D. *Directions in internal combustion engine research*. *Combustion and Flame*, 160 (2013), pp. 1-8.

REIS, A. V., MACHADO, A. L. L. T, TILLMANN, C. A. C., MORAES, M. L. B. *Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes*. 2ª. Ed. Pelotas: Editora Gráfica Unversitária UFPel, 2005.