

# 1. Introdução

O motor de ignição por compressão (ICO), concebido por Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913), revolucionou o mundo das invenções no final do século XVIII por conta dos resultados obtidos na época: apresentou rendimento térmico 34% maior que os motores do ciclo Otto e quase três vezes maior que o das máquinas a vapor (Lance Day, 2002).

Denominado de motor Diesel, em homenagem ao engenheiro que o concebeu, foi apresentado oficialmente na Feira Mundial de Paris em 1900. Naquela ocasião, utilizou óleo de amendoim como combustível. O abastecimento com substratos de plantas oleaginosas estava previsto no projeto inicial, tendo por finalidade desenvolver a agricultura local e a dos países que tivessem a intenção de adquirir o motor diesel. (Ayhan Demirbas, 2007; Saddleback Educational Publishing, 2008).

Entretanto, os combustíveis de origem vegetal foram substituídos por um derivado do petróleo, batizado de óleo diesel, também em homenagem a Rudolf Diesel. A troca ocorreu sem maiores obstáculos, porque o combustível de origem fóssil apresentava propriedades físico-químicas mais estáveis, logística de produção e de transportabilidade mais atraentes e condições econômicas mais competitivas. Além disso, as preocupações com os reveses ambientais, por conta da poluição gerada pela queima dos combustíveis de origem fóssil, ainda eram incipientes naquela época.

Estes fatores fizeram com que a idealização de um motor que funcionasse com óleo vegetal e contribuísse para desenvolvimento da agricultura fosse deixado de lado, restando apenas a afirmação quase profética atribuída a Rudolf Diesel: *“O motor a diesel pode ser alimentado por óleos vegetais, e ajudará no desenvolvimento agrário dos países que vierem a utilizá-lo... O uso de óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante hoje em dia. Mas com o tempo irá se tornar tão importante quanto o petróleo e o carvão são atualmente”*.

Contudo, ao longo dos anos, o óleo diesel tem apresentado aspectos

contraproducentes nos campos econômico e ambiental.

Na área econômica dois episódios merecem destaque: a chamada “Crise do Petróleo” que eclodiu na década de 1970 e as diversas guerras que ainda ocorrem nas regiões em que se localizam os principais produtores de petróleo. Episódios como estes provocam a escassez do produto, elevam substancialmente o preço do óleo diesel e, por vezes, desestabilizaram a economia mundial.

No setor ambiental, o destaque negativo fica por conta dos múltiplos problemas gerados pela utilização dos derivados de petróleo como por exemplo: emissões de gases tóxicos provenientes da utilização de óleo diesel que afetam diretamente o meio ambiente e, em casos pontuais, o ser humano (Yolanda, 2010); vazamentos decorrentes de ruptura em dutos subterrâneos e desastres devido à derramamento de óleo bruto nos mares e nos rios.

A instabilidade econômica gerada pela variação do preço do petróleo e a preocupação com a preservação do meio ambiente podem ser elencados como os principais fatores que motivaram o desenvolvimento de pesquisas para encontrar um modo de substituir o óleo diesel, mesmo que parcialmente.

Os estudos são direcionados para adequação de um novo combustível para abastecer o motor ICO, ou para adaptação do motor ICO para operar com mais de um combustível simultaneamente, como por exemplo, diesel e etanol. Assim, substituindo parcialmente o diesel pelo etanol, seria possível diminuir as emissões de gases poluentes da queima do óleo diesel. Isto seria possível porque o sistema de combustão nos motores diesel convencionais teve poucas alterações desde que foi inventado por Rudolf Diesel. O funcionamento segue basicamente o mesmo critério: após a admissão de ar no interior do cilindro, o pistão se desloca do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS), comprimindo o ar e, conseqüentemente, elevando a temperatura deste. Em seguida, o combustível é injetado com alta pressão na câmara dando início à combustão. Entretanto, a queima do combustível nestas condições produz zonas de temperatura elevadas, promovendo a formação de altas concentrações de óxidos de nitrogênios (NOx).

A descoberta de novas tecnologias utilizadas no tratamento dos gases de combustão, por meio de catalisadores, não tem sido suficiente célere para adequar os motores diesel às regras de emissões cada vez mais rigorosas. Este fato estimulou o desenvolvimento de novas tecnologias que tornassem possível obter uma combustão com temperatura relativamente mais baixa. Este método de combustão,

conhecido como sistema de baixa temperatura de combustão, ou ainda, *Low Temperature Combustion* (LTC), caracteriza-se, por apresentar redução significativa nas emissões de NOx e MP. (C. Arcoumanis, 2009).

As investigações reconhecidas no meio científico como as precursoras do processo de combustão com baixa temperatura, ocorreram em 1979, no estudo publicado por Onishi *et al.* Os pesquisadores conseguiram estabelecer condições específicas para que um motor de ignição por centelha (ICE) de dois tempos alcançasse a ignição espontânea. Como resultado obtiveram reduções significativas nas emissões (Hsien-Hsin Liao, 2011). Este processo ficou conhecido como ATAC (Active Thermo Atmosphere Combustion).

Em 1983 os pesquisadores Najt e Foster aplicaram o conceito de baixa temperatura combustão em um motor CFR para avaliar a combustão de misturas homogêneas (combustível, ar e gases de escape recirculados) com ignição por compressão. O estudo revelou que a combustão depende da cinética química e que utilizando as concentrações corretas é possível operar um motor em modo de combustão de carga homogênea com ignição por compressão. (Najt, P. and Foster, D., 1983).

Posteriormente, em 1889, Thring investigou o efeito da recirculação dos gases de exaustão (EGR) em processo de baixa temperatura de combustão com mistura de ar-combustível homogênea. Os resultados apontam economia de combustível comparável à do motor diesel (Thring RH. 1989; H. Zhao, 2007; Adam, Nor Mariah, 2012).

Outros métodos baseados na LCT foram desenvolvidos ao longo dos anos, sendo que os que apresentam mais relevância para o desenvolvimento do presente trabalho são: ignição por compressão de carga homogênea (HCCI); ignição por compressão de carga pré-misturada (PCCI) e ignição por compressão de carga com reatividade controlada (RCCI). As siglas referem-se, respectivamente, a Homogeneous Charge Compression Ignition; Premixed Charge Compression Ignition; e a Reactivity Controlled Compression Ignition.

No motor que funciona com tecnologia HCCI a mistura ar-combustível é comprimida no interior do cilindro provocando o aumento da temperatura e, posteriormente, a autoignição que ocorre perto do ponto morto superior. Desta forma é dispensada a presença de uma centelha no sistema de combustão. (Pierre D. e Xavier M., 2004; Harvir *et al.*, 2005)

A tecnologia HCCI combina um sistema de combustão baseado na autoignição por compressão observado nos motores ICO e um sistema de suprimento de combustível baseado na mistura ar-combustível observado nos motores ICE.

As principais características do motor HCCI são:

- O controle da combustão é dificultado devido à forte dependência que a tecnologia tem em relação à cinética química do combustível.
- A carga é controlada variando a quantidade de combustível uma vez que o fluxo de ar sempre será o máximo.
- O aumento da velocidade de operação do motor diminui o tempo disponível para que a combustão aconteça, resultando no retardo da ignição. Este fato limita a operação do motor em relação às velocidades de operação. (Hatim Machrafi, 2012)
- As emissões de NOx e PM são menores e as de HC e CO são maiores se comparado aos motores ICO convencionais. A vantagem dessa característica é que o HC e o CO são mais facilmente controlados por conversores catalíticos. (Allen Fuhs, 2008) (Sara McAllister, 2011).
- Em cargas parciais, a autoignição da mistura não costuma provocar detonações destrutivas.

Os motores ICO que utilizam a tecnologia PCCI se caracterizam por ter parte do combustível injetado coletor de admissão, formando uma mistura ar-combustível e a parte restante do combustível injetada na diretamente na câmara de combustão. A pré-mistura aumenta a homogeneidade global na câmara de combustão. (M.K. Gajendra Babu, K.A, 2013).

### **1.1. Tecnologia RCCI**

Desenvolvida na Universidade de Wisconsin-Madison, a tecnologia RCCI, é um aprimoramento das tecnologias PCCI e HCCI. Caracteriza-se principalmente por fornecer maior controle no processo de combustão, além de ter a capacidade de diminuir tanto o consumo de combustível quanto as emissões de NOx e MP.

A metodologia se baseia na injeção separada de dois combustíveis com diferentes reatividades, como por exemplo: gasolina e diesel, etanol e diesel, gasolina e gasolina aditivada da com peróxido de di-terc-butílico (DTBP), produto que aumenta o número de cetano. Neste contexto específico a palavra “reatividade” está relacionada com o número de cetano (CN). Quanto maior o CN de um combustível, maior será a reatividade deste (Reitz, R., Duraisamy, G.).

Um motor que opera utilizando a tecnologia RCCI funciona da seguinte forma:

- Um combustível de **baixa reatividade**, uniformemente misturado com o ar, é introduzido no cilindro.
- Antes de iniciar a combustão da mistura ar-combustível que se encontra no interior do cilindro, um combustível de **alta reatividade** é injetado diretamente na câmara de combustão.
- O contato do combustível de alta reatividade com a mistura ar-combustível dá início a combustão.

O funcionamento de um motor operando com tecnologia RCCI está representado na Figura 1.1.

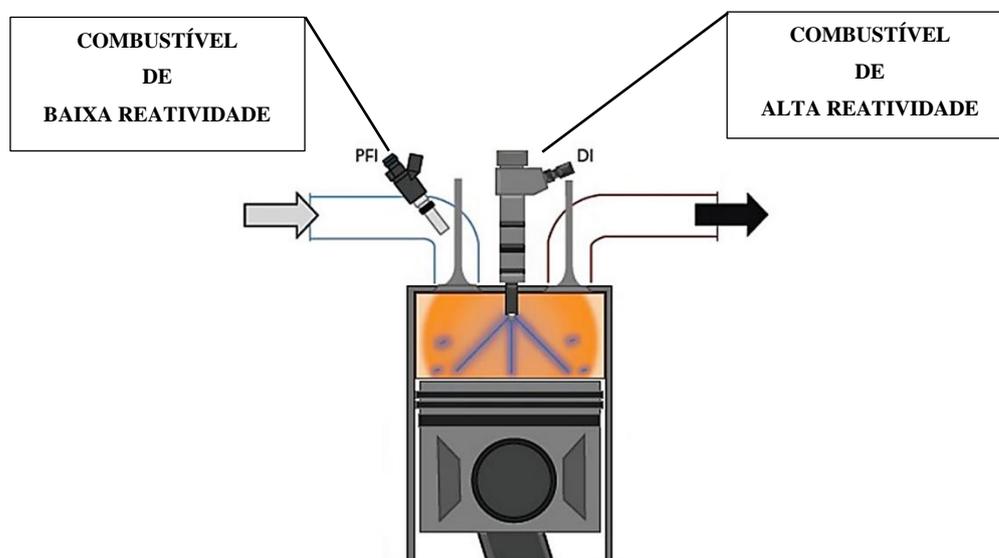


Figura 1.1 – Injeção de combustível no motor RCCI.

(Adaptado do <https://www.warf.org/media/portfolios/RCCIBrochureV9-FINAL-B-HighRes.pdf>. Acessado em 09 de janeiro de 2018)

A mistura dos combustíveis permite que a combustão ocorra com temperaturas mais baixas, reduzindo tanto a quantidade de energia necessária para

manter o motor aquecido, quanto a energia perdida (calor) por meio das paredes do cilindro. (Reitz, 2011)

As principais vantagens da tecnologia RCCI são:

- Apresenta as menores taxas de emissões de NOx e MP.
- Aumenta a eficiência de combustível.
- Elimina a necessidade sistemas de pós-tratamento.

Nos experimentos desenvolvidos neste trabalho foi utilizado um motor ICO monocilíndrico, adaptado para operar com tecnologia RCCI, injetando diesel e etanol diretamente na câmara de combustão.

## **1.2. Objetivos**

O presente trabalho tem dois objetivos:

- Adaptar um motor ICO monocilíndrico para operar com tecnologia RCCI. Para atingir este objetivo foram realizadas as seguintes ações: montagem de uma bancada experimental de testes composta por um motor ICO monocilíndrico em um banco dinamométrico; instalação de dois sistemas de injeção, uma para diesel e outro para etanol; adequação do cabeçote do motor para operar com dois injetores (diesel e etanol) com sistema individuais de injeção direta; instrumentação da bancada experimental para captar dados de pressão, temperatura, torque, rotação e vazão de combustível; montagem de um sistema de computacional para coletar e armazenar os dados; e instalação de atuadores eletrônicos para controlar as injeções de combustível.

- Empregar estratégias de dupla e tripla injeção (diesel/etanol) diretamente na câmara de combustão para aumentar a eficiência e alcançar a máxima taxa de substituição do diesel pelo etanol. Para atingir este objetivo será utilizado o motor adaptado para operar com tecnologia RCCI.

### 1.3 Contribuição

A contribuição inédita deste trabalho está situada no emprego de estratégias de dupla e tripla injeção (diesel/etanol) diretamente na câmara de combustão, no motor adaptado para operar com tecnologia RCCI, para aumentar a eficiência e alcançar a máxima taxa de substituição do diesel pelo etanol.

### 1.4 Organização da Tese

Este trabalho é composto por oito capítulos que descrevem os testes realizados, a metodologia empregada, os equipamentos utilizados, o estado da arte, os resultados comentados e a conclusão final.

O primeiro capítulo destina-se a contextualizar o trabalho no estado da arte, relacionando a importância do tema à diminuição da dependência do combustível fóssil e ao controle das emissões provenientes da combustão nos motores. Além disso, apresenta os objetivos e a contribuição do trabalho para o meio científico.

O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica, almejando destacar os estudos já realizados na área e descrever as contribuições alcançadas.

O terceiro e o quarto capítulos destinam-se, respectivamente, a mostrar as características técnicas dos componentes empregados na bancada experimental e a descrever a metodologia empregada nos testes.

O tratamento dos dados obtidos nos experimentos, a modelagem do cálculo da taxa de calor aparente e a as propriedades físico-químicas dos combustíveis utilizados são descritas nos capítulos quinto, sexto e sétimo.

O oitavo capítulo apresenta os resultados obtidos nos testes e os comentários relativos a estes.

O nono capítulo é reservado para as conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

No décimo capítulo estão depositadas as referências bibliográficas.