

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Nícollas de Carvalho Gomes**

**Avaliação do potencial de diversos combustíveis  
em motores de combustão por compressão  
utilizando a tecnologia RCCI**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle  
Coorientador: Sérgio Leal Braga

Rio de Janeiro

Julho de 2019

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Nícollas de Carvalho Gomes**

**Assessment of the potential of various fuels in  
compression ignition engines using RCCI  
technology**

**Graduation Project**

Graduation Project presented to the Departamento f Mechanical  
Engineering of PUC-Rio

Advisor: Florian Alain Yannick Pradelle  
Supervisor: Sérgio Leal Braga

Rio de Janeiro

July de 2019

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço aos meus pais, Nilton e Vilma, pelo apoio, carinho e dedicação. Pais que nunca mediram esforços e fizeram o possível e o impossível para que eu e minha irmã pudéssemos ter a melhor educação e assim a oportunidade de construir um futuro melhor.

Agradeço a minha namorada Luiza, pelo amor, paciência, apoio e companheirismo e por sempre ter fé de que tudo daria certo no final.

Agradeço a todos os meus familiares, por acreditarem em mim. Em especial aos meus tios Nilson e Tereza e aos meus primos Taina, Thaian e Safira, por me receberem de braços abertos sempre que precisei.

Por fim, a todos os professores, e principalmente ao meu orientador Florian, pelos ensinamentos em toda essa trajetória na universidade.

## RESUMO

Os motores de combustão por compressão que utilizam os combustíveis fósseis, são grandes emissores de gases de efeito estufa. Pesquisas avançam cada vez mais sobre o tema, a fim de deixar os motores mais eficientes, tanto em questões energéticas quanto em questões ambientais.

O presente trabalho utiliza a metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV), para analisar e comparar a emissão de  $CO_2$  equivalente em uma abordagem do poço a roda em motores de ignição por compressão de reatividade controlada (RCCI), utilizando diferentes combustíveis de baixa e alta reatividade. O estudo foi realizado a partir do levantamento de trabalhos anteriores, voltados para motores RCCI com diferentes combinações de combustíveis e diferentes ranges de pressão efetiva média indicada (IMEP) e recirculação dos gases de exaustão (EGR). Dezesesseis publicações relacionadas ao tema são apreciadas, obtendo-se cento e doze casos diferentes de utilização de motores RCCI. Os combustíveis analisados são diesel, biodiesel, metano, metanol, gás natural, n-butanol, gasolina, éteres dimetílicos de polioximetileno (PODE) e etanol. A taxa de IMEP e EGR variou de 4 a 23 bar e de 0 a 57 %, respectivamente. Ao final deste trabalho, conclui-se que motores RCCI que utilizam a gasolina como o combustível de baixa reatividade e o PODE como combustível de alta reatividade, são os que possuem melhores resultados, quando comparado com os outros combustíveis analisados. As emissões de do motor se mantiveram abaixo de 200 g/kw.h em todos os casos analisados e as taxas emissão de total (do poço a roda), não ultrapassaram de 300 g/kw.h.

Palavras chave: RCCI, Emissão, Eficiência, Combinação de combustíveis, Combustão interna

## ABSTRACT

Compressed-combustion engines using fossil fuels are large emitters of greenhouse gases. Research is advancing more and more on the subject in order to make engines more efficient, both in energy and in environmental issues. The present work uses the life cycle assessment (LCA) methodology to analyze and compare the emission of equivalent in a well-wheel approach in controlled-reactive compression ignition (RCCI) engines, using different low reactivity. The study was carried out from the survey of previous works, directed to RCCI engines with different combinations of fuels and different ranges of indicate mean effective pressure (IMEP) and exhaust gas recirculation (EGR). Sixteen publications related to the subject are appreciated, obtaining one hundred and twelve different cases of use of RCCI engines. The fuels analyzed are diesel, biodiesel, methane, methanol, natural gas, n-butanol, gasoline, polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE) and ethanol. The rate of IMEP and EGR ranged from 4 to 23 bar and from 0 to 57%, respectively. At the end of this work, it is concluded that RCCI engines that use gasoline as low reactivity fuel and PODE as high reactivity fuel, are the ones with the best results when compared to the other fuels analyzed. The emissions of the engine remained below 200 g / kW.h in all cases analyzed and the emission rates of total (from well to wheel) did not exceed 300 g/kW.h. $CO_2$

Keywords: RCCI, Emission, Efficiency, Dual Fuel Engine, Internal Combustion

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	9
2	Revisão bibliográfica .....	10
2.1	Motores de combustão interna .....	10
2.1.1	Motores de combustão por compressão .....	10
2.1.2	Motores de Ignição por Compressão de Reatividade Controlada (RCCI) .....	17
2.2	Caracterização dos Combustíveis .....	22
3	Metodologia .....	23
3.1	Avaliação do ciclo de vida (ACV) .....	23
3.2	Aquisição dos dados .....	24
4	Resultados e discussão .....	27
5	Conclusão .....	30
6	Referências bibliográficas .....	31

## Lista de figuras

Figura 1 Esquema de funcionamento de um motor 4 tempos – Imagem modificada do Heywood, 1988 .....	11
Figura 2 Representação dos tipos de injeção - Indireta x Direta – Imagem modificada do site <a href="http://www.autocarup.com.br">www.autocarup.com.br</a> – 15 abril de 2019 .....	13
Figura 3 - Diagrama da Pressão x Volume do ciclo diesel teórico – Modificada de Repositório UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) .....	13
Figura 4 - Diagrama da Temperatura x Entalpia do ciclo diesel teórico - <a href="http://www.mspc.eng.br">www.mspc.eng.br</a> - 30/04/2019.....	14
Figura 5 - Movimentação do pistão associado ao diagrama P x V do ciclo diesel - Modificada de Repositório UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) .....	14
Figura 6 - Ciclo Diesel Real x Ciclo Diesel Teórico (Pressão x Volume) – ENIDH, 2013 .....	16
Figura 7 - Principais substâncias emitidas em motores de combustão por compressão (MERKER, 2010) .....	16
Figura 8 - Índice de número de cetano .....	17
Figura 9 - Representação do motor RCCI – Imagem modificada de Li, 2017...	18
Figura 10 - Ciclo de vida dos combustíveis – Imagem modificada de <a href="http://blog.arcelormittal.com.br">blog.arcelormittal.com.br</a> .....	23
Gráfico 1 - Emissão de CO <sub>2</sub> na produção de diferentes tipos de combustíveis	27
Gráfico 2 - Emissão de CO <sub>2</sub> do motor em relação a potência máxima indicada .....	28
Gráfico 3 - Emissão de CO <sub>2</sub> na produção + motor em relação a potência máxima indicada.....	29
Gráfico 4 - Emissão de CO <sub>2</sub> na produção + motor em relação ao EGR.....	30

## Lista de tabela

Tabela 1 - Influência dos tempos de injeção – Adaptado de LI, 2017.....	19
Tabela 2- Análise da eficiência e emissões em motores RCCI, utilizando diferentes combustíveis.....	21
Tabela 3 - Principais propriedades dos combustíveis analisados da tabela 3 ..	22
Tabela 4 - Dados para cálculo da potência máxima indicada .....	26

# 1 Introdução

A utilização de combustível fóssil em motores de combustão por compressão, resulta em um elevado nível de poluentes emitidos na exaustão, lançando ao meio ambiente hidrocarbonetos não queimados (*UHC*), óxidos de nitrogênio (*NO<sub>x</sub>*), monóxido de carbono (*CO*), dióxido de carbono (*CO<sub>2</sub>*) e óxidos de enxofre (*SO<sub>x</sub>*). As consequências da emissão desses poluentes ao meio ambiente, estão relacionadas a problemas de saúde e ao aquecimento global. A evolução desses motores está caminhando para a utilização de biocombustíveis, que apesar de terem eficiência térmica um pouco menor comparado ao combustível fóssil, produzem potência bastante semelhante. Os biocombustíveis também possuem vantagens relacionadas a disponibilidade local, diminuindo a dependência de commodities que são sujeitas a variações devido ao contexto geopolítico e a emissão de poluentes, por serem renováveis, realizarem queima limpa e não serem tóxicos como os combustíveis fósseis derivados do petróleo (SIVARAMAKRISHNAN e RAVIKUMAR, 2014).

Considerando o impacto ambiental dos motores de combustão interna levantadas anteriormente, institutos de pesquisa e desenvolvimento estão em busca de novas tecnologias, capazes de diminuir a quantidade de emissão *CO<sub>2</sub>*, de fuligens e outros produtos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Apesar de existirem maneiras de se fazer o pós-tratamento dessas partículas, o foco da pesquisa é desenvolver tecnologias que haja diretamente sobre os motores, visto que a utilização de filtros e catalisadores, apesar de eficientes, aumenta tanto o custo (fabricação e manutenção) quanto o peso e, conseqüentemente, o consumo de combustível (REITZ, 2015).

O objetivo desse estudo é investigar a emissão dos gases de efeito estufa em motores RCCI (Ignição por Compressão de Reatividade Controlada). Além disso, é realizada uma breve análise termodinâmica e do funcionamento dos motores RCCI e CI, breve análise das injeções direta e indireta de combustível e análise da influência dos tempos de ignição (SOI).

A partir do levantamento da literatura, o impacto ambiental usando o conceito de avaliação de ciclo de vida (ACV) em motores a combustão por compressão é analisado. A emissão de  $CO_2$  equivalente dos motores na queima do combustível é somado com a emissão de  $CO_2$  proveniente da produção do combustível utilizado no motor. A comparação do impacto ambiental foi feita analisando diferentes potências máximas indicadas (PI) e diferentes taxas de recirculação de gases de exaustão (EGR).

## **2 Revisão bibliográfica**

### **2.1 Motores de combustão interna**

Neste capítulo, são introduzidos os motores de combustão interna e os modelos estudados, apresentando dados que possibilitam a comparação dos motores de combustão por compressão tradicionais com os motores de Ignição por Compressão de Reatividade Controlada (RCCI). Os motores são analisados do ponto de vista termodinâmico, fluidodinâmico e ambiental, com relação a emissão de poluentes do poço à roda. Além disso, discute-se os diferentes sistemas de injeção em um motor de combustão por compressão e levanta-se a caracterização simples dos combustíveis, tanto dos combustíveis fósseis como dos renováveis.

#### **2.1.1 Motores de combustão por compressão**

De acordo com Heywood (1988), ainda antes de 1876 começaram a surgir e se desenvolver os motores a combustão interna projetados por Nikolaus Otto. A principal característica do motor desenvolvido por Otto, e que leva seu nome, é a ignição dada por centelha. Por volta do ano de 1892, Rudolf Diesel desenvolveu o seu motor que, ao invés da ignição por centelha, utiliza o conceito de ignição por compressão. O motor de Diesel tinha uma eficiência de cerca de 34% maior que o motor concebido por Otto, e comparado com as máquinas a vapor da época, a eficiência era até quatro vezes maior (Day, 2002 *apud* Teixeira, 2019). Assim, os

motores de combustão por compressão são máquinas térmicas largamente utilizadas na indústria, desde veículos de pequeno porte até grandes geradores de empresas, devido à sua maior eficiência energética e maior durabilidade em comparação com os motores de ciclo Otto (REITZ, 2015).

Tipicamente, os motores de combustão interna possuem quatro tempos de trabalho: a admissão, a compressão, a expansão e a exaustão, como demonstrado na figura 1.

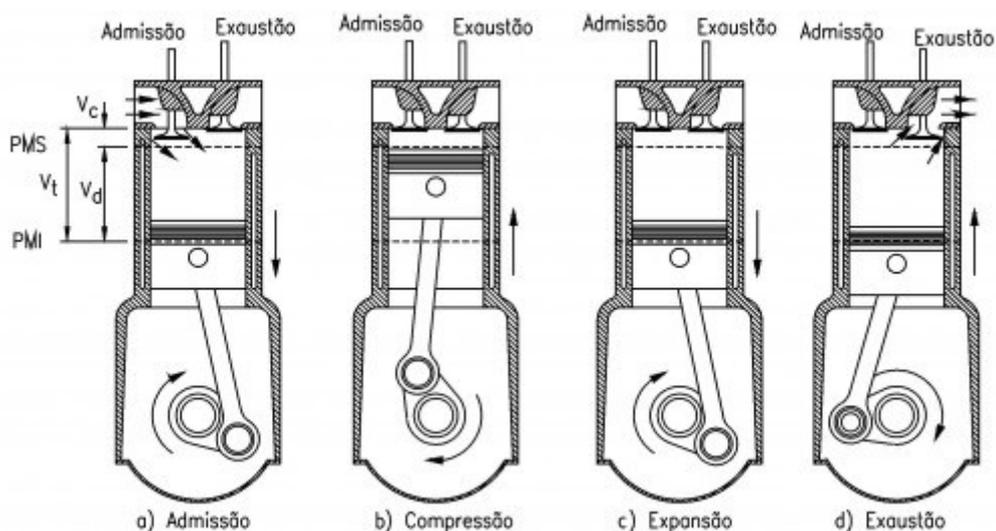


Figura 1 Esquema de funcionamento de um motor 4 tempos – Imagem modificada do Heywood, 1988

Na admissão, a válvula de admissão se abre para que ar seja introduzido no cilindro, ao mesmo tempo em que o pistão se move para baixo. Vale ressaltar que somente ar entra na câmara de combustão nesse momento para os motores de ignição por compressão, ao invés da mistura ar e combustível, como em alguns outros sistemas (motores Ciclo Otto, por exemplo). Logo, o pistão se move do ponto morto superior (PMS) – posição em que o pistão se encontra na parte superior do cilindro onde o volume é mínimo – para o ponto morto inferior (PMI) – posição em que o pistão se encontra na parte inferior do cilindro onde o volume é máximo.

Na compressão, as duas válvulas estão fechadas e o pistão começa a subir. O volume dentro da câmara de combustão é comprimido, aumentando a pressão e a temperatura significativamente. O combustível é injetado diretamente no cilindro ou

em uma pré-câmara, e antes que o pistão atinja o ponto morto superior ocorre a autoignição, devido à alta pressão e temperatura em que a câmara se encontra.

No momento do início da expansão, comumente chamado de combustão, o pistão se encontra perto do PMS e é empurrado para baixo, até o PMI. Isso ocorre pois os gases gerados pela autoignição começam a expandir e agir sobre a cabeça do pistão.

Por último, ocorre a exaustão. A válvula de exaustão é aberta e o pistão então parte do PMI para o PMS, expulsando os gases resultantes da combustão. Dessa maneira, o ciclo retorna ao primeiro tempo, repetindo todo o processo (HEYWOOD, 1988).

Os motores de compressão interna são classificados em duas categorias, que dependem do design da câmara de combustão. Essas classificações são injeção direta e injeção indireta. No sistema de injeção direta, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão. No sistema de injeção indireta, a câmara de combustão é dividida em duas regiões, a pré-câmara e a câmara principal. O combustível é injetado na pré-câmara, que está localizada logo acima da câmara principal. A pré-câmara é conectada a câmara principal por um ou mais orifícios, que permitem a passagem do combustível (HEYWOOD, 1988).

De acordo com Heywood (1988), a injeção direta é utilizada, normalmente, em motores de grande porte. Isso porque, a forma como o combustível é injetado na câmara de combustão, somado ao design do pistão, garantem uma taxa de mistura de ar e combustível suficiente para que ocorra a ignição espontânea. Nesse caso, o bico injetor fica localizado no centro e possui vários furos, e o formato do pistão possibilita o aumento do volume na câmara. Em motores de menor tamanho, é exigido que a mistura de ar e combustível atinja a taxa necessária mais rapidamente. Para que isso ocorra, altera-se o design da cabeça do pistão, causando maior movimento (turbulências) no ar que é admitido.

A injeção indireta é comumente utilizada em automóveis de pequeno porte que utilizam motores de combustão por compressão. O aumento do volume na cabeça do pistão, devido ao seu formato, como nos motores de injeção direta, não garante que haja mistura de ar-combustível suficiente para motores menores e de alta velocidade.

O princípio desse tipo de sistema é a injeção de combustível em uma pré-câmara, como citado anteriormente. No momento em que se inicia a compressão, o êmbolo se move do PMI para o PMS, empurrando o ar da câmara de combustão principal para a pré-câmara. O ar passa pelos orifícios que dividem a câmara principal da câmara secundária. Ao entrar na câmara secundária, o ar ganha rotação e o combustível é injetado, com pressão muito inferior ao do sistema de injeção direta. A combustão se inicia na pré-câmara e os gases gerados retornam a câmara principal, forçando o pistão para baixo (HEYWOOD 1988).

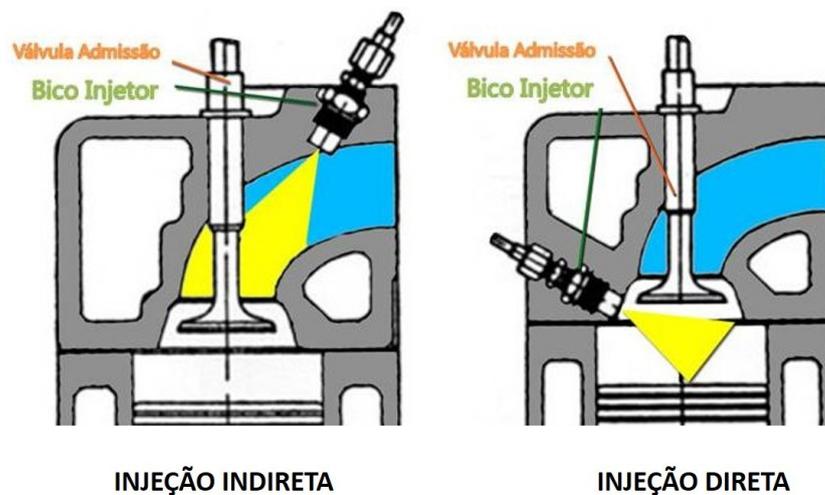


Figura 2 Representação dos tipos de injeção - Indireta x Direta – Imagem modificada do site [www.autocarup.com.br](http://www.autocarup.com.br) – 15 abril de 2019

Termodinamicamente, o ciclo diesel pode ser aproximado pelo ciclo ideal (padrão ar). Os diagramas da figura 3 e figura 4 representam o ciclo diesel padrão.

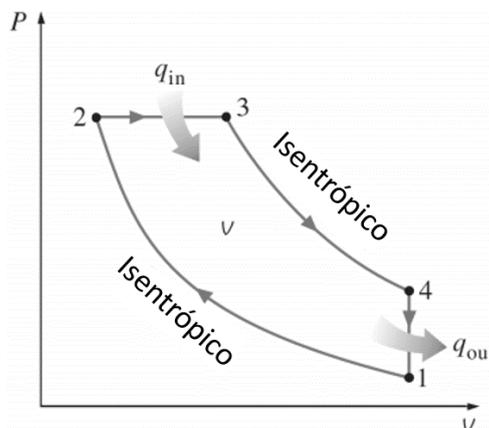


Figura 3 - Diagrama da Pressão x Volume do ciclo diesel teórico – Modificada de Repositório UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

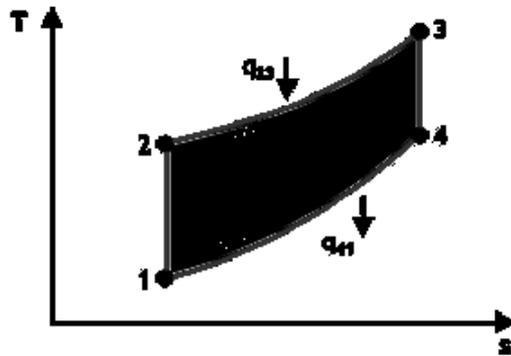


Figura 4 - Diagrama da Temperatura x Entalpia do ciclo diesel teórico - [www.mspc.eng.br](http://www.mspc.eng.br) - 30/04/2019

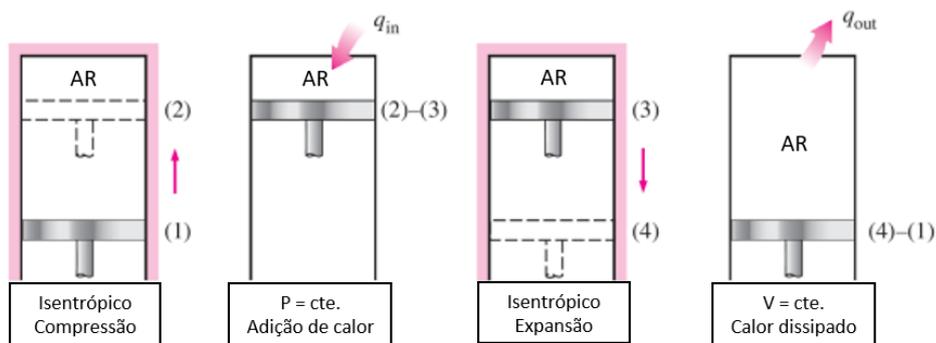


Figura 5 - Movimentação do pistão associado ao diagrama  $P \times V$  do ciclo diesel - Modificada de Repositório UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

Na figura 3, está representado o diagrama da pressão em função do volume do ciclo diesel e na figura 4 o diagrama de temperatura em função da entropia. A área interna do diagrama descreve o trabalho resultante. No processo 1-2, ocorre a compressão isentrópica (entropia permanece constante). No processo 2-3, calor é adicionado ao sistema a pressão constante no PMS. O processo 3-4, representa a expansão isentrópica. Finalizando, realiza-se a transferência de calor, em que calor é rejeitado pelo sistema, no PMI. Todos os processos são reversíveis

- Processo 1-2: O volume é comprimido de  $v_{1-4}$  para  $v_2$ . A pressão aumenta de  $p_1$  para  $p_2$ . Trabalho  $w_{1-2}$  é consumido, sem que haja dissipação de calor. A temperatura aumenta de  $T_1$  para  $T_2$ .

- Processo 2-3: A pressão se mantém constante (isobárica)  $p_2 = p_3$ . O volume é expandido de  $v_2$  para  $v_3$ . Calor  $q_{in}$  é fornecido ao sistema. Ocorre o aumento da temperatura de  $T_2$  para  $T_3$ .
- Processo 3-4: O volume é expandido de  $v_3$  para  $v_4$ . A pressão diminui de  $p_3$  para  $p_4$ . A temperatura decai de  $T_3$  para  $T_4$  e trabalho  $w_{3-4}$  é realizado.
- Processo 4-1: O volume permanece constante (isocórica)  $v_1 = v_4$ . Nesse momento a pressão decai de  $p_4$  para  $p_1$ . Também ocorre a queda de temperatura de  $T_4$  para  $T_1$ . Calor  $q_{out}$  é rejeitado do sistema.

A equação que determina a eficiência térmica de um motor que trabalha com o ciclo diesel. A eficiência térmica é a razão entre o trabalho líquido do ciclo e o calor adicionado ao sistema. Caracteriza-se a eficiência como:

$$\eta = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = \frac{m \times C_v \times (T_4 - T_1)}{m \times C_p \times (T_3 - T_2)} \quad (1)$$

Dessa maneira, sabendo-se a temperatura dos estados do ciclo, é possível obter a eficiência térmica (HEYWOOD, 1988), (BRAGA, 2015).

Rearrmando a equação acima, obtêm-se:

$$\eta = 1 - \frac{1}{k \times r^{k-1}} - \left( \frac{\left( \frac{v_3}{v_2} \right)^k - 1}{\frac{v_3}{v_2} - 1} \right) \quad (2)$$

Com  $k = \frac{C_p}{C_v}$  e taxa de compressão  $r = \frac{v_1}{v_2}$

Comparado ao ciclo teórico, o ciclo real possui algumas outras considerações que precisam ser levadas em conta, como por exemplo em relação as perdas de calor, a combustão e ao tempo de abertura das válvulas. No ciclo teórico não se considera a perda de calor, enquanto no ciclo real temos calor sendo dissipado para fora do sistema. A pressão no ciclo teórico varia durante todo o processo de combustão. A Figura 6 mostra a comparação entre o ciclo diesel real e o ciclo diesel teórico.



### 2.1.2 Motores de Ignição por Compressão de Reatividade Controlada (RCCI)

$NO_x$  Motores de Ignição por Compressão de Reatividade Controlada (RCCI), são uma variante dos motores de Ignição por Compressão de Cargas Homogêneas (HCCI) e que utiliza a tecnologia da injeção de dois combustíveis ou a mistura dos combustíveis antes da injeção, a fim de alterar a sua reatividade e aumentar o controle de todo o processo de combustão (Li, 2017). O foco desse estudo é na utilização de dois injetores por cilindro. As pesquisas nos motores RCCI foram iniciadas pelo Centro de Pesquisa de Motores (*Engine Research Center – ERC*) de Universidade de Wisconsin-Madison e pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge (*Oak Ridge National Laboratory – ORNL*), ambos nos Estados Unidos. Os testes iniciais foram feitos em motores de pequeno e grande porte. (REITZ, 2015). O funcionamento dos motores RCCI se baseia na utilização de dois injetores por cilindro. Cada injetor é responsável por injetar um tipo de combustível; um combustível de baixa reatividade e outro de alta reatividade, sendo reatividade a tendência que uma reação química tem em acontecer.

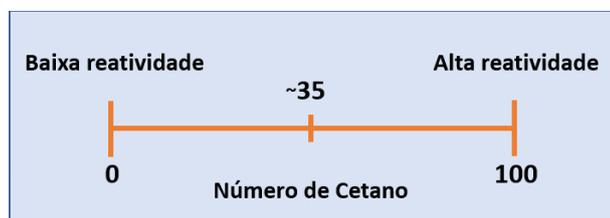


Figura 8 - Índice de número de cetano

Segundo Li (2017), a reatividade pode ser quantificada pelo número de cetano do combustível. Quanto maior o número de cetano, maior sua reatividade e mais rápida será sua autoignição (combustão espontânea do combustível na câmara, independente de uma fonte de ignição). Para calcular o número de cetano resultante no cilindro é utilizada a fórmula a seguir:

$$CN_{dual} = \frac{CN_{low} \cdot X_{low} + CN_{high} \cdot X_{high}}{X_{low} + X_{high}} \quad (3)$$

onde  $CN_{low}$  e  $CN_{high}$  são o número de cetano e  $X_{low}$  e  $X_{high}$  são a fração do número de mols do combustível de baixa e alta reatividade, respectivamente.

De acordo com Teixeira (2019), a primeira etapa do ciclo de um motor RCCI é a introdução da mistura homogênea de ar com o combustível de baixa reatividade no cilindro. A mistura é feita ao injetar o combustível na admissão, como nos motores de Ignição por Compressão de Carga Pré-misturada (PCCI). Em seguida, via injeção direta, é introduzido o combustível de alta reatividade na câmara de combustão, o que dá início a combustão. O esquema do funcionamento de um motor RCCI está representado na Figura 9.

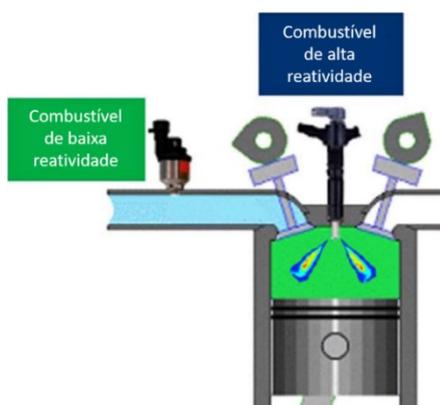


Figura 9 - Representação do motor RCCI – Imagem modificada de Li, 2017

Em estudos de motores RCCI, são utilizados os combustíveis fósseis gasolina ou gás natural (baixa reatividade) e diesel (alta reatividade). Outros exemplos de combustíveis de baixa reatividade, que podem ser utilizados são: metanol, metano, n-butanol, éteres dimetílicos de polioximetileno (PODE) e etanol. Os combustíveis de alta reatividade se limitam basicamente no diesel e no biodiesel, sendo o primeiro um combustível cuja base é o petróleo e o segundo um combustível de origem vegetal e animal. Para a produção do biodiesel, existe na natureza uma vasta quantidade de matéria prima que pode ser utilizada. Outra vantagem do combustível de origem vegetal e animal, é a redução de emissão dos gases de efeito estufa após a combustão.

Para que essa estratégia de utilização de dois combustíveis seja viável, é necessária a utilização de duas linhas de combustíveis para o armazenamento, transporte e injeção dos combustíveis (Li, 2017). Porém, esse método permite o maior controle da combustão a fim de aumentar a eficiência do motor e reduzir as emissões. No experimento de Teixeira (2019) no Laboratório de Engenharia Veicular da PUC-Rio, o etanol foi utilizado como o combustível de baixa reatividade e o diesel como o

combustível de alta-reatividade. A utilização desses combustíveis é apenas uma das combinações possíveis. Diversos tipos de combustíveis de alta e baixa reatividade podem ser combinados, e utilizados em motores RCCI (Li, 2017).

Com a mistura de combustíveis, nota-se uma redução da quantidade de energia necessária para manter o motor aquecido e uma menor dissipação de calor para as paredes do cilindro. Isso porque, devido a reatividade dos combustíveis, a combustão ocorre em temperaturas mais baixas (REITZ, 2015). A partir da simulação feita por Li (2015), a emissão de  $NO_x$  utilizando a combinação de gasolina e diesel em motores RCCI, é de cerca de 200 ppm. Valor considerado baixo, quando comparado a valores obtidos em motores convencionais.

O tempo de injeção dos combustíveis (SOI – *Start of Injection*) é o parâmetro mais importante para determinar diversas características e o controle da combustão, para uma dada proporção de combustíveis de baixa e alta reatividade. Como visto na Tabela 1, modificar o tempo de injeção, influencia na emissão de  $NO_x$  e outros gases nocivos à saúde e no pico de pressão no interior do cilindro (REITZ, 2015). Ao utilizar tempos de injeção mais avançados, o sistema se torna mais propenso a ser reativamente controlado. Utilizar tempos de injeção mais atrasados, possibilita um maior controle da mistura dos combustíveis dentro do cilindro. Controlar a mistura de combustível, pode ser refletido na quantidade de calor dissipado no sistema. Tempos de injeção de combustíveis muito avançados ou muito atrasados ( $145^\circ$  e  $15^\circ$ ), aumentam a quantidade de calor dissipado (LI, 2017).

Tabela 1 - Influência dos tempos de injeção – Adaptado de LI, 2017

	Combustíveis baixa/alta	SOI	Performance	Pico de Pressão	Emissão de $NO_x$	Emissão de Fuligem	Emissão de UHC	Emissão de CO
1	n-butanol/biodiesel	$-43^\circ$ para $-35^\circ$	↑	↑	↑	↑	↓	↓
2	n-butanol/biodiesel	$-10^\circ$ para $-4^\circ$	↓	↓	↓	↓	↑	↑

↑ - Aumento ↓ - Diminuição

Na Tabela 1, é possível observar que, em um motor de mesma configuração, retardar a injeção de  $-43^\circ$  para  $-35^\circ$ , representa aumento da eficiência térmica, do pico de pressão no cilindro e de  $NO_x$  e diminuição dos hidrocarbonetos que não são queimados (UHC – *Unburned Hydrocarbon*) e da emissão de CO. O oposto ocorre ao retardar a injeção de  $-10^\circ$  para  $-4^\circ$ . É possível verificar que a eficiência térmica, o pico

de pressão no cilindro e a emissão de  $NO_x$  diminuem e a quantidade de hidrocarbonetos não queimados e de  $CO$  produzidos na combustão aumentam.

A Tabela 2 apresenta os dados da eficiência e das emissões de diversos estudos de casos de motores RCCI, utilizando diferentes combinações de combustíveis e condições de setup para os testes. São analisados 10 tipos diferentes de combinações de combustíveis. O range de potência variou de 1 a 75 kW, que foram calculados a partir da pressão efetiva média indicada (IMEP). Além disso, a massa de combustível de baixa e alta reatividade variou de 0 a 95% e 5 a 100% respectivamente.

A partir dessa tabela, determinou-se quais casos seriam analisados de acordo com os dados presentes nas publicações. Algumas das publicações não possuem dados suficientes para análise e por tanto não foram utilizados no presente estudo.

Tabela 2- Análise da eficiência e emissões em motores RCCL, utilizando diferentes combustíveis

Publicação	Combustível baixa/alta	Potência máxima indicada(kW)	IMEP (bar)	m LRF (%)	m HRF (%)	EGR(%)	Emissão de UHC (g/kw.h)	Emissão de CO (g/kw.h)	Emissão de NOx (g/kw.h)	Emissão de fuligens (g/kw.h)
LI, 2015	gasolina/diesel	3,32	5,0 - 5,1	0 – 50	50 - 100	-	-	-	-	-
DEMPSEY, 2013	gasolina/diesel	15,55	3,5 - 17	70 - 95	11079	0-60	-	-	0,02 - 0,14	-
TONG, 2016	gasolina/diesel	18,80	13,9	70 - 87	13 - 30	42,5 - 45	7,09 - 9,09	4,07 - 10,84	0,110 - 0,281	321,11 - 297,82
BENAJES, 2014	gasolina/diesel	-	-	75	25	45	7 - 9	11	0,7 - 0,9	0,001 - 0,010
PAYKANI, 2015	gás natural/diesel	6,51 - 84,27	4 - 23	73 - 85	15 - 27	0	2,2 - 283,2	1,1 - 44,1	0,02 - 0,8	0,001 - 0,044
MOHAMMADNEJAD, 2019	metano/diesel	2,40	9,13	85	15	0	0,41	0,63	0,16	-
DEMPSEY, 2013	metanol/diesel	15,55	3,5 - 17	55 - 95	5 - 45	0-60	-	-	0,05 - 0,35	-
LI, 2013	metanol/diesel	1,92 - 2,38	6 - 7,5	75	25	50	3 - 20	5 - 15	0,005 - 0,015	1 - 0,09
LIU, 2014	n-butanol/biodiesel	12,85	9,85	90	10	35 - 45	3,1 - 12,8	4,7 - 17,9	0 - 2	0,001 - 0,007
LI, 2015	gasolina/biodiesel	8,49	4,6 - 14,6	48	52	-	-	-	0,5 - 3	0 - 0,075
ZHOU, 2015	metanol/biodiesel	75	-	60	40	-	-	0 - 1	0 - 1	0 - 1
FANG, 2019	etanol/diesel	6,85 - 13,95	4,3 - 8,6	88	12	0 - 29	14,75 - 73,75	5,29 - 35,36	0,988 - 1,748	0,001 - 0,006
CHARITA,2018	diesel/biodiesel	5,55	-	70	30	-	-	-	-	-
WANG, 2019	iso-octano/n-hexadecano	13,12	9,7	-	-	35-60	2,5 - 9	2,5 - 9	0,3 - 0,7	0,03 - 0,09
WANG, 2019	iso-octano/PRF	13,12	9,7	-	-	35-60	0,4 - 20	5 - 20	0,1 - 0,7	0,02 - 0,065
TONG, 2016	gasolina/PODE	12,85 - 23,8	9,5 - 17,6	55 - 77	33 - 45	33 - 57,6	3,85 - 9,93	4,6 - 62,5	0,12 - 0,45	0,002 - 0,017

## 2.2 Caracterização dos Combustíveis

Na Tabela 3, é possível observar as características dos principais combustíveis que podem ser misturados e utilizados nos motores RCCI e que serão estudados nesse trabalho. É possível observar que o número de cetano da gasolina é 10, um valor baixo, que caracteriza o combustível como de baixa reatividade, e o biodiesel possui número de cetano igual à 47, tornando-o um bom combustível de alta reatividade. Além disso, a Tabela 3 apresenta a disponibilidade de oferta no mercado dos combustíveis levantados nesse estudo e se eles são renováveis ou não.

*Tabela 3 - Principais propriedades dos combustíveis analisados da tabela 3*

Combustível	Fórmula Química	Poder calorífico (MJ/kg)	Número de cetano	Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) (temp)	Viscosidade (mPa.s) (temp)	Disponibilidade no mercado	Renovável
Gasolina	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	43,5 [XIAN, 2016]	10 [XIAN, 2016]	0,7371 (20°C) [XIAN, 2016]	0,5 - 0,6 (20°C) [LIU, 2014]	Alta	Não
Óleo Diesel	C <sub>12</sub> H <sub>23</sub>	42,8 [XIAN, 2016]	48 [XIAN, 2016]	0,8179 (20°C) [XIAN, 2016]	2,8 - 5,0 (20°C) [LIU, 2014]	Alta	Não
Biodiesel	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub>	37,5 [LIU, 2014]	47 [LIU, 2014]	0,885 (20°C) [LIU, 2014]	4,11 (40°C) [LIU, 2014]	Média	Sim
Metano	CH <sub>4</sub>	50,02 (DOOSJE, 2014)	-	0,000667 (20°C) [ABULENCIA, 2009]	1,34. 10 <sup>-3</sup> (20°C) [ABULENCIA, 2009]	Alta	Sim
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	19,9 [XIAN, 2016]	3 - 5 [XIAN, 2016]	0,7930 (20°C) [XIAN, 2016]	0,59 (25°C) [LIU, 2014]	Alta	Sim
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	26,8 [XIAN, 2016]	8 [XIAN, 2016]	0,7893 (20°C) [XIAN, 2016]	1,2 (20°)	Alta	Sim
n-butanol	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	35,1 [XIAN, 2016]	12 [XIAN, 2016]	0,81 (20°C) [XIAN, 2016]	3,64 (20°C) [LIU, 2014]	Baixa	Sim
iso-octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	44,65 [WANG, 2018]	12 [WANG, 2018]	0,69 (20°C) [WANG, 2018]	0,72 (20°C) [WANG, 2018]	Baixa	Sim
hexadecano	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	44,9 [WANG, 2018]	100 [WANG, 2018]	0,77 (20°C) [WANG, 2018]	3,07 (20°C) [WANG, 2018]	Baixa	Sim
PRF	-	44,79 - 44,93 [WANG, 2018]	34 - 56 [WANG, 2018]	0,680 - 0,686 (20°C) [WANG, 2018]	0,59 - 0,63 (20°C) [WANG, 2018]	Baixa	Sim
PODE	PODE	21,77 [TONG, 2016]	75,5 [TONG, 2016]	1,04 (25°C) [TONG, 2016]	1,11 (25°C) [TONG, 2016]	Baixa	-

São denominados combustíveis renováveis, os combustíveis que podem ser repostos a curto ou médio prazo, seja espontaneamente ou por intervenção humana. Como exemplo, o etanol que é feito a partir da cana de açúcar e o biodiesel de soja. Combustíveis não renováveis são, basicamente, os combustíveis derivados do petróleo ou nucleares. (REIS, 2019).

## 3 Metodologia

### 3.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

O conceito de ciclo de vida refere-se a (i) extração das matérias primas; (ii) produção; (iii) distribuição; (iv) consumo e descarte de um dado produto ou serviço, chamado de unidade funcional (Figura 10). Em alguns casos, considera-se também o processo de reciclagem e reuso do produto ou serviço estudado.



Figura 10 - Ciclo de vida dos combustíveis – Imagem modificada de [blog.arcelormittal.com.br](http://blog.arcelormittal.com.br)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é um método de análise que leva em conta todos os processos, desde a extração das matérias primas (naturais ou não) necessárias para a produção, até o uso e o descarte da unidade funcional, para mensurar os possíveis impactos ambientais, tais como poluição atmosférica, aquecimento global e esgotamento dos recursos naturais. Para obter a emissão de  $CO_2$ , foi realizado um cálculo de equivalência para  $CO$  e  $NO_x$ . A massa de  $CO_2$  equivale a 24 vezes a massa de  $CO$  e 265 vezes a massa de  $NO_x$ . O aquecimento global é responsável pelo aumento da temperatura média do planeta terra, causado pelo acúmulo dos gases de efeito estufa. Comumente, utiliza-se a terminologia do “poço-a-roda” para representar a perimetra coberto pela ACV (CARNEIRO, 2017).

As normas ISO14040 e ISO14044, determinam a estrutura e os princípios da análise da ACV. De acordo com as normas, os estudos de ACV são divididos em quatro etapas: (i) definição dos objetivos e escopo; (ii) análise de inventário; (iii) avaliação dos impactos; (iv) interpretação dos resultados.

A etapa (i) de definição dos objetivos e escopo é a determinação da unidade funcional, das regras seguidas (em particular o que trata do método de alocação para tratar os co-produtos), dos impactos e dos critérios de qualidade a serem considerados no estudo. A etapa (ii) de análise de inventário consiste na coleta de dados que representam o fluxo mássico e de energia que entram e saem de todas as etapas do ciclo de vida. A etapa (iii) de avaliação dos impactos é a análise dos impactos ambientais. Os fluxos mássicos e de energia são convertidos em impactos ambientais, através da multiplicação dos valores obtidos na etapa (ii) por fatores de equivalência que remetem a resultados em unidades conhecidas. E, por último a etapa (iv) de interpretação dos resultados tem como propósito de checar a integridade e a consistência dos resultados e quais são as limitações e conclusões da análise feita.

### 3.2 Aquisição de dados

Os dados para o presente trabalho foram obtidos a partir do levantamento de estudos relacionados a motores de tecnologia RCCI (Tabela 2), procurando publicações que fizessem a análise das emissões de  $UHC$ ,  $CO$  e  $NO_x$ , para diferentes tipos de combinação de combustíveis. Para obter os valores, foi realizada a leitura de tabelas, gráficos utilizando a ferramenta WebPlotDigitizer e quando necessário, era realizada a conversão das unidades funcionais.

A potência máxima indicada em  $kW$  é representada por:

$$P_i = \frac{IMEP \cdot V_d \cdot N}{2} \quad (4)$$

sendo  $IMEP$  a pressão média indicada do motor em  $bar$ ,  $V_d$  o volume do deslocamento em  $m^3$ , calculado a partir do diâmetro e do curso do cilindro e  $N$  o número de rotações em  $rpm$  (Heywood, 1988). A Tabela 4 apresenta os dados necessários para a realização do cálculo de PI.

Em algumas das literaturas analisadas, a informação da quantidade de combustível de baixa e de alta reatividade que foram utilizadas no experimento foi dada em relação a quantidade de diesel equivalente. Para obter a vazão mássica do

combustível em questão, primeiramente é preciso obter o total de energia injetada (EI) na câmara, multiplicando a vazão mássica de diesel pelo seu poder calorífico inferior (PCI). Em seguida, a porcentagem do combustível utilizado é multiplicada por EI e dividido pelo seu PCI.

$$m_{diesel} \times PCI = EI \quad (5)$$

$$m_{combustível} = \frac{\%_{combustível} \times EI}{PCI_{combustível}} \quad (6)$$

Para obter a emissão de  $CO_2$  de cada um dos casos analisados, foi feito o balanço de massa, a partir da equação de combustão incompleta, onde  $M$  é a massa molar em g/mol e  $m$  é a massa em gramas do combustível (PRADELLE, 2017).

$$Combustível = CO + CO_2 + NO_x + HC \quad (7)$$

$$\frac{M_{carbono}}{M_{combustível}} \times m_{combustível} = \frac{M_{carbono}}{M_{CO_2}} \times m_{CO_2} + \frac{M_{carbono}}{M_{CO}} \times m_{CO} + \frac{M_{carbono}}{M_{HC}} \times m_{HC} \quad (8)$$

Para cada um dos combustíveis utilizados nos casos, foi obtido a quantidade de  $CO_2$  emitida na sua produção. A fim de obter a emissão total, do poço-a-roda, considerou-se a quantidade de combustível utilizada na mistura para fazer uma equivalência da emissão de  $CO_2$  em cada um dos casos.

*Tabela 4 - Dados para cálculo da potência máxima indicada*

Publicação	Combustível baixa/alta reatividade	IMEP (bar)	N (rpm)	Curso (mm)	Diâmetro (mm)	Vd (m <sup>3</sup> )	Potência máxima indicada (kW)
LI, 2015	gasolina/diesel	5,00	1600	92,00	83,10	0,00050	3,32
DEMPSEY, 2013	gasolina/diesel	17,00	2300	90,40	82,00	0,00048	15,55
TONG, 2016	gasolina/diesel	13,90	1500	125,00	105,00	0,00108	18,80
BENAJES, 2014	gasolina/diesel	-	1200	152,00	123,00	0,00181	-
MOHAMMADNEJAD, 2019	gás natural/diesel	9,13	1300	165,10	137,20	0,00244	24,13
PAYKANI, 2015	gás natural/diesel	23,00	1800	165,10	137,20	0,00244	84,17
LI, 2013	metanol/diesel	7,50	2000	50,00	70,00	0,00019	2,40
LIU, 2014	n-butanol/biodiesel	9,50	1500	125,00	105,00	0,00108	12,85
LI, 2015	gasolina/biodiesel	14,60	1400	92,00	83,10	0,00050	8,49
WANG, 2019	iso-octano/PRF	9,70	1500	125,00	105,00	0,00108	13,12
FANG,2014	etanol/diesel	8,60	1500	125,00	115,00	0,00130	13,95
TONG, 2016	gasolina/PODE	17,60	1500	125,00	105,00	0,00108	23,80

## 4 Resultados e discussão

O Gráfico 1 apresenta os valores das emissões de  $CO_2$  em  $g\ CO_2\ eq./kw.h$  na produção dos combustíveis analisados no presente trabalho. É possível observar que o diesel, é o combustível que possui a maior emissão de  $CO_2$  na produção.  $CO_2$  A gasolina, o diesel e o metanol possuem valores aproximados de emissão de  $CO_2$  na sua produção, visto que todos são produzidos a partir de recursos fósseis. O biodiesel, o etanol e o gás natural são os combustíveis que emitem menos gases poluentes para a atmosfera quando transformados em fontes de energia, por utilizarem de fontes renováveis. O valor negativo de PODE significa que  $CO_2$  está sendo retirado da atmosfera (captura de  $CO_2$ ).

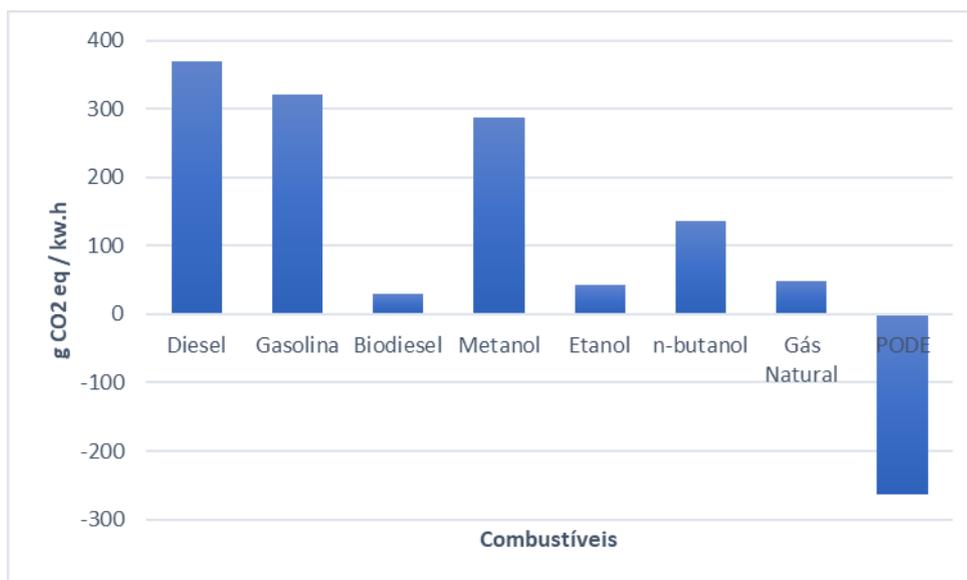


Gráfico 1 - Emissão de  $CO_2$  na produção de diferentes tipos de combustíveis

A relação entre a emissão de  $CO_2$  no motor e da potência máxima indicada está exposta no Gráfico 2.

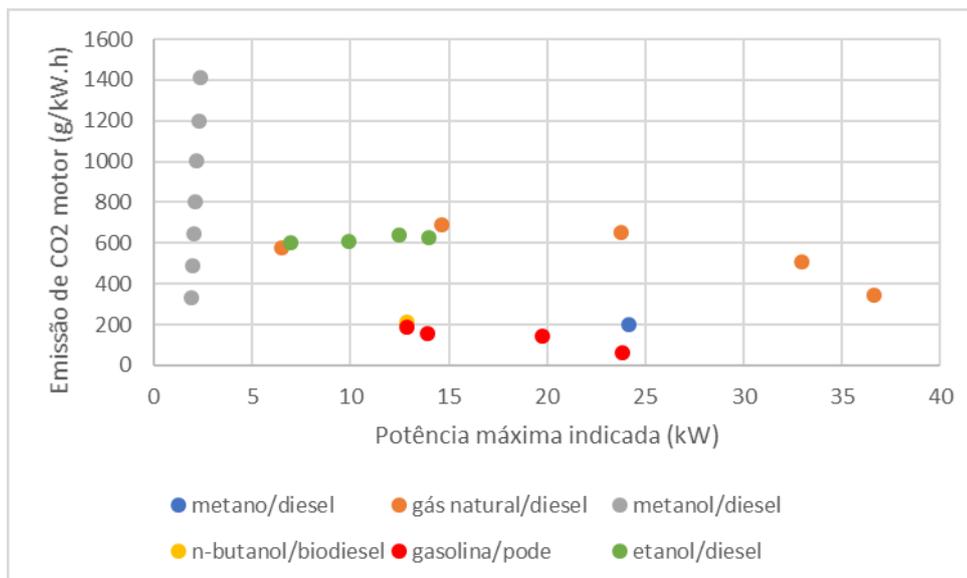


Gráfico 2 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor em relação a potência máxima indicada

É possível observar nos casos de LI, 2013 (metanol/diesel), que quanto maior a potência máxima indicada, maior a emissão de CO<sub>2</sub>. Logo, para baixas potências o uso de metanol/diesel é indicado. Os casos analisados de PAYKANI, 2015, utilizando gás natural e diesel como a combinação de combustível mostram que quanto maior a potência indicada, menor é a emissão de CO<sub>2</sub>. Utilizando etanol e diesel, não é possível observar grandes variações de emissão quando se aumenta a potência. Em todos os outros casos, mesmo com o aumento da PMI, os valores da emissão dos gases não sofrem grandes variações.

Comparando diferentes casos, com diferentes combustíveis, em um mesmo ponto de PMI, é possível concluir que os estudos feitos por TONG, 2016, utilizando gasolina/PODE (combustíveis de baixa-reatividade/alta-reatividade) são os que possuem menores emissões de CO<sub>2</sub>.

Diferente do Gráfico 2, o Gráfico 3 traz a análise da emissão de CO<sub>2</sub> total (poço-a-roda), desde o processo de produção até a sua utilização na máquina térmica, desconsiderando o transporte do combustível, considerando que todos possuem emissão equivalente no transporte. Ou seja, foi somado à emissão de CO<sub>2</sub> no motor, a emissão de CO<sub>2</sub> na produção do combustível (Gráfico 1).

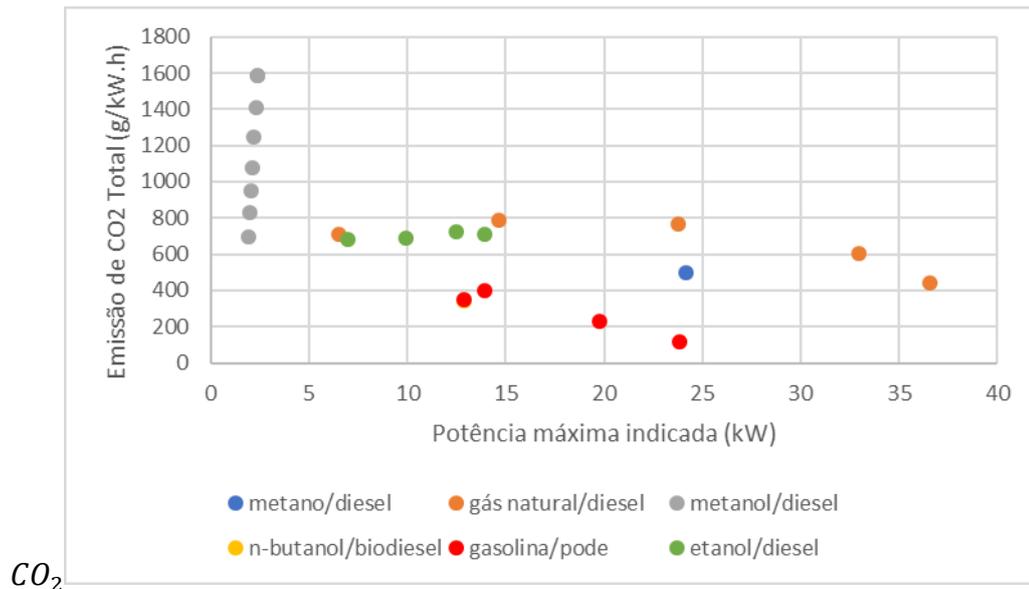


Gráfico 3 - Emissão de  $CO_2$  na produção + motor em relação a potência máxima indicada

Novamente os casos de TONG, 2016, utilizando gasolina e PODE em motores RCCI são os que apresentam melhores valores nas emissões de  $CO_2$ . Pode-se verificar que utilizando a combinação gasolina e PODE, ao aumentar a PMI, diminuiu-se a emissão de  $CO_2$ . Os casos analisados por LI, 2013 (Metanol e diesel), apresentam os valores mais altos mesmo com PMIs mais baixos, comparados aos outros casos analisados. Isso ser explicado pelo fato de LI, 2013 utilizar dois combustíveis (metanol/diesel) que possuem alta emissão, tanto na produção quanto na utilização. Os casos realizados com etanol e diesel se mantêm constantes mesmo com a variação de potência. Os casos analisados com gás natural e diesel, também se mostram mais eficientes quando lavados a potências mais altas.

A partir do Gráfico 4, obtêm-se a emissão de combustível total (poço-a-roda) em relação ao EGR (%) utilizado em cada caso. Para uma mesma combinação de combustível utilizada em um motor RCCI, não se nota um aumento significativo das emissões quando aumentada a porcentagem de EGR. O IMEP dos casos do Gráfico 4 são iguais a: metano/diesel = 24,13 bar; gás natural/diesel = 23 bar (médio), metanol/diesel = 2,15 bar (médio); n-butanol/biodiesel = 12,85 bar; gasolina/diesel = 18,65 (médio); etanol/diesel = 10,83 (médio).

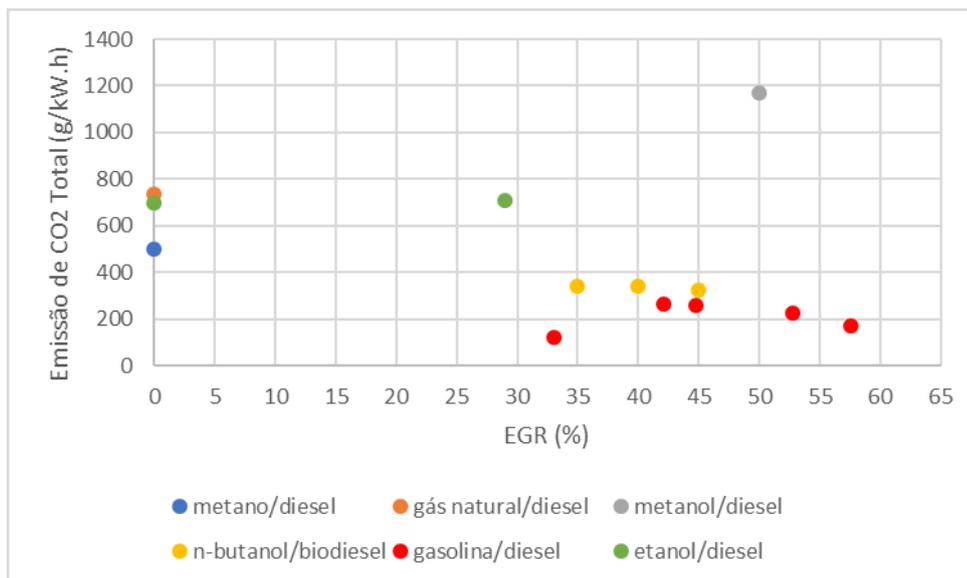


Gráfico 4 - Emissão de CO2 na produção + motor em relação ao EGR

Mais uma vez é possível observar que os estudos feitos por TONG, 2016, utilizando gasolina e PODE, obtiveram os melhores resultados em relação a emissão de  $CO_2$ , quando comparado a uma mesma taxa de EGR. Isso se dá, pois como visto anteriormente no Gráfico 1, o PODE possui emissão negativa até a chegada ao consumidor, o que o destaca como o combustível mais eficiente quando se coloca em comparação com os outros, fazendo a análise do poço-a-roda.

Ao sofrer variações no EGR (%), as combinações de n-butanol/biodiesel e etanol/diesel se mostraram constantes em relação a emissão de  $CO_2$ , não sofrendo grandes variações em relação ao EGR.

A utilização de metanol e diesel mais uma vez se mostrou elevada em relação aos outros casos analisados.

## 5 Conclusão

Com as análises realizadas de trabalhos anteriores, obtendo-se os dados de todos os casos por meio de tabelas e gráficos, foi possível realizar o estudo das eficiências dos motores RCCI. Os motores que utilizam como combustível de baixa

reatividade a gasolina e de alta reatividade o PODE, obtém melhores resultados de emissão de  $CO_2$  equivalente, tão somente emissões do motor quanto do poço-a-roda, quando comparado a outros motores que trabalhando com a queima de outros tipos de combustíveis, a uma mesma taxa de potência máxima indicada (PMI) e de recirculação dos gases de exaustão (EGR).

Como o experimento de um motor RCCI é um experimento complexo e que requer recursos financeiros e tempo para sua realização, optou-se pelo estudo de casos realizados anteriormente em motores RCCI. Apesar de bastante amplo os estudos relacionados aos motores RCCI, com diferentes combinações de combustíveis, a falta de dados relacionado ao setup utilizado nos testes, impediu que as análises de outros combustíveis fossem feitas. Dados faltantes como o IMEP do motor, a emissão de  $UHC$ ,  $CO$  e  $NO_x$  e as dimensões do motor utilizado.

Sugere-se que estudos futuros abordem a comparação das emissões dos motores RCCI com as emissões de gases de efeito estufa de motores elétricos, fazendo a análise do poço-a-roda. Apesar de ser considerada uma energia limpa, indiretamente, motores elétricos geram emissões de  $CO_2$  e outras substâncias em sua produção.

## 6 Referências bibliográficas

BENAJES, Jesús et al. An investigation on RCCI combustion in a heavy duty diesel engine using in-cylinder blending of diesel and gasoline fuels. **Applied Thermal Engineering**, v. 63, n. 1, p. 66-76, 2014.

CARNEIRO, Maria Luisa NM et al. Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 632-653, 2017.

CHARITHA, V. et al. Investigation on performance and emissions of RCCI dual fuel combustion on diesel-bio diesel in a light duty engine. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1081-1088, 2019.

CHEN, Zhanming; WANG, Long; ZENG, Ke. A comparative study on the combustion and emissions of dual-fuel engine fueled with natural gas/methanol, natural gas/ethanol, and natural gas/n-butanol. **Energy Conversion and Management**, v. 192, p. 11-19, 2019.

CHEN, Zhuo et al. Life cycle assessment of typical methanol production routes: The environmental impacts analysis and power optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 408-416, 2019.

DEMPSEY, Adam B.; WALKER, N. Ryan; REITZ, Rolf. Effect of piston bowl geometry on dual fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) in a light-duty engine operated with gasoline/diesel and methanol/diesel. **SAE International Journal of Engines**, v. 6, n. 1, p. 78-100, 2013.

DEUTZ, Sarah et al. Cleaner production of cleaner fuels: wind-to-wheel–environmental assessment of CO<sub>2</sub>-based oxymethylene ether as a drop-in fuel. **Energy & Environmental Science**, v. 11, n. 2, p. 331-343, 2018.

DINCĂ, Cristian; BADEA, Adrian; APOSTOL, Tiberiu. Life cycle impact assessment of fossil fuels. **Natural gas**, v. 9, n. 25.3, p. 9.5, 2010.

DOOSJE, Erik; WILLEMS, Frank; BAERT, Rik. **Experimental demonstration of RCCI in heavy-duty engines using diesel and natural gas**. SAE Technical Paper, 2014.

FANG, Wei et al. An experimental investigation of reactivity-controlled compression ignition combustion in a single-cylinder diesel engine using hydrous ethanol. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 137, n. 3, p. 031101, 2015.

FURUHOLT, Edgar. Life cycle assessment of gasoline and diesel. **Resources, conservation and recycling**, v. 14, n. 3-4, p. 251-263, 1995.

HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1. ed. Singapura: McGraw-Hill, 1988.

LI, J. et al. Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study. **Applied Energy**, v. 155, p. 59-67, 2015.

LI, Jing et al. Numerical investigation on the effect of reactivity gradient in an RCCI engine fueled with gasoline and diesel. **Energy Conversion and Management**, v. 92, p. 342-352, 2015.

LI, Jing; YANG, Wenming; ZHOU, Dezhi. Review on the management of RCCI engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 65-79, 2017.

LI, Yaopeng et al. Numerical study on the combustion and emission characteristics of a methanol/diesel reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine. **Applied energy**, v. 106, p. 184-197, 2013.

LIU, Haifeng et al. Experimental and simulation investigation of the combustion characteristics and emissions using n-butanol/biodiesel dual-fuel injection on a diesel engine. **Energy**, v. 74, p. 741-752, 2014.

MOHAMMADNEJAD, S. et al. Effects of the swirl ratio and spray angle on the mixture stratification in a diesel–NG RCCI engine. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 5, p. 233, 2019.

NOUR, Mohamed; ATTIA, Ali MA; NADA, Sameh A. Combustion, performance and emission analysis of diesel engine fuelled by higher alcohols (butanol, octanol and heptanol)/diesel blends. **Energy Conversion and Management**, v. 185, p. 313-329, 2019.

PAPADOPOULOU, Marion et al. Life Cycle Assessment of the European Natural Gas Chain focused on three environmental impact indicators.

PAYKANI, Amin et al. Effects of diesel injection strategy on natural gas/diesel reactivity controlled compression ignition combustion. **Energy**, v. 90, p. 814-826, 2015.

PRADELLE, F. A. Y. **Use of biofuels in compression ignition engines—potential of diesel–biodiesel–ethanol blends**. 2017. Tese de Doutorado. Thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

REIS, Pedro. Fontes de energia renováveis e não renováveis. **Portal-Energia**, 2019. Disponível em <<https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>>. Acesso em: 22 de jun. de 2019

REITZ, Rolf D.; DURAISAMY, Ganesh. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 46, p. 12-71, 2015.

SIVARAMAKRISHNAN, K.; RAVIKUMAR, P. Optimization of operational parameters on performance and emissions of a diesel engine using biodiesel. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, n. 4, p. 949-958, 2014.

TAO, Ling et al. Techno-economic analysis and life-cycle assessment of cellulosic isobutanol and comparison with cellulosic ethanol and n-butanol. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 1, p. 30-48, 2014.

TEIXEIRA, C. Ignição por compressão com reatividade controlada e dupla injeção direta diesel-etanol. [s. l.], 2019. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

TONG, Laihui et al. Experimental study of RCCI combustion and load extension in a compression ignition engine fueled with gasoline and PODE. **Fuel**, v. 181, p. 878-886, 2016.

WANG, Hu et al. The effects of DI fuel properties on the combustion and emissions characteristics of RCCI combustion. **Fuel**, v. 227, p. 457-468, 2018.

ZHOU, D. Z. et al. A numerical study on RCCI engine fueled by biodiesel/methanol. **Energy Conversion and Management**, v. 89, p. 798-807, 2015.

ZOU, Xian et al. **Numerical study of the RCCI combustion processes fuelled with methanol, ethanol, n-butanol and diesel**. SAE Technical Paper, 2016.

## **Apêndice 1 – Tabela completa com os dados das publicações**

Publicação	Caso	M comb	Rotação (rpm)	Combustível baixa/alta	Potência máxima indicada(kW)	IMEP (bar)	RP(%)	EGR (%)	SOI 1 (graus)	SOI 2 (graus)	Total de combustível (mg)	m LRF (%)	m HRF (%)	m LRF (mg)	m HRF (mg)	Emissão de UHC (g/kw.h)	Emissão de CO2 (g/kw.h)	Emissão de CO (g/kw.h)	Emissão de Nox (g/kw.h)	Emissão de fuligens (g/kw.h)	Emissão Total de CO2 (g/kw.h)
MOHAMMADNEJAD, 2019	1	62,45	1300	metano/diesel	24,13	9,13		0,00	-87,30	-38,30	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	0,410	201,297	0,630	0,160	-	500,784
PAYKANI, 2015	1	21,168	800	gás natural/diesel	6,51	4,00		0,00	-52,90	-22,50	40,00	73,00	27,00	29,20	10,80	17,062	574,387	14,007	0,020	0,003	709,593
	2	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	2,620	689,139	1,252	0,018	0,001	786,022
	3	29,202	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	50,00	50,00	44,50	44,50	2,187	435,895	1,053	0,797	0,002	644,553
	4	23,408	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	65,00	35,00	57,85	31,15	2,741	543,460	1,520	0,406	0,002	704,215
	5	19,532	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	80,00	20,00	71,20	17,80	2,756	652,165	1,604	0,141	0,002	765,017
	6	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	3,402	686,854	2,208	0,025	0,001	783,738
	7	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-100,00	-40,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	4,213	686,669	1,810	0,058	0,002	783,552
	8	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-70,00	-40,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	4,008	687,304	1,536	0,064	0,002	784,188
	9	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-55,00	-40,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	3,774	688,183	1,126	0,075	0,002	785,066
	10	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-80,00	-60,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	3,501	687,628	1,653	0,030	0,002	784,511
	11	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-80,00	-40,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	3,489	687,702	1,613	0,045	0,002	784,586
	12	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-80,00	-30,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	3,476	687,802	1,558	0,065	0,002	784,685
	13	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-80,00	-15,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	6,976	677,317	6,003	0,011	0,003	774,200
	14	18,511	800	gás natural/diesel	14,64	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	2,143	689,575	1,278	0,062	0,001	786,458
	15	18,511	1300	gás natural/diesel	23,79	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	2,156	689,413	1,373	0,026	0,001	786,296
	16	18,511	1800	gás natural/diesel	32,94	9,00		0,00	-87,30	-38,30	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	130,490	509,771	34,023	0,026	0,003	606,655
	17	18,511	2000	gás natural/diesel	36,59	9,00		0,00	-80,00	-15,00	89,00	85,00	15,00	75,65	13,35	283,246	341,136	44,128	0,025	0,003	438,020
	18	18,511	1800	gás natural/diesel	84,17	23,00		0,00	-92,70	-20,40	228,00	85,00	15,00	193,80	34,20	17,512	663,715	9,032	0,035	0,044	760,599
LI, 2013	1	167,000	2000	metano/diesel	1,92	6,00		50,00	27,00		21,00	0,00	100,00	0,00	21,00	12,760	329,714	1,750	0,020	0,009	698,052
	2	117,451	2000	metano/diesel	1,95	6,08		50,00	27,00		22,00	10,00	90,00	2,20	19,80	14,474	490,539	1,566	0,018	0,008	826,941
	3	90,576	2000	metano/diesel	2,03	6,33		50,00	27,00		23,00	20,00	80,00	4,60	18,40	11,974	646,701	1,342	0,016	0,002	951,167
	4	73,710	2000	metano/diesel	2,11	6,59		50,00	27,00		24,00	30,00	70,00	7,20	16,80	9,342	802,693	1,158	0,015	0,000	1075,223
	5	62,140	2000	metano/diesel	2,18	6,79		50,00	27,00		26,00	40,00	60,00	10,40	15,60	8,947	1004,424	1,065	0,013	0,007	1245,018
	6	53,709	2000	metano/diesel	2,28	7,11		50,00	27,00		28,00	50,00	50,00	14,00	14,00	6,974	1199,481	0,855	0,011	0,007	1408,140
	7	47,292	2000	metano/diesel	2,36	7,37		50,00	27,00		30,00	60,00	40,00	18,00	12,00	7,368	1409,337	0,697	0,008	0,010	1586,060
	8	42,245	2000	metano/diesel	2,38	7,43		50,00	27,00		34,00	70,00	30,00	23,80	10,20	13,684	1769,751	0,539	0,004	0,016	1914,539

TONG, 2016	1	63,336	1500	gasolina/diesel	18,80	13,90	87,50	42,50	-55,00	-8,00	50,00	87,09	12,91	43,55	6,45	7,090	152,828	4,070	0,110	0,148	397,820
	2	88,784	1500	gasolina/pode	23,80	17,60	55,00	33,00	-3,00		50,00	54,74	45,26	27,37	22,63	3,995	63,194	16,872	0,429	0,012	119,222
	3	75,555	1500	gasolina/diesel	12,85	9,50	70,00	45,00	-12,00		50,00	69,67	30,33	34,84	15,16	9,085	177,867	10,843	0,281	0,104	321,109
	4	70,643	1500	gasolina/pode	12,85	9,50	77,00	45,00	-12,00		50,00	76,64	23,36	38,32	11,68	9,063	196,441	8,064	0,311	0,011	380,383
	5	83,888	1500	gasolina/pode	19,74	14,60	60,00	42,10	-6,00		80,00	59,72	40,28	47,78	32,22	3,850	180,184	4,610	0,450	0,004	265,283
	6	83,888	1500	gasolina/pode	19,74	14,60	60,00	44,80	-8,00		80,00	59,72	40,28	47,78	32,22	4,530	173,894	8,180	0,290	0,002	258,993
	7	83,888	1500	gasolina/pode	19,74	14,60	60,00	52,80	-12,00		80,00	59,72	40,28	47,78	32,22	6,440	142,048	27,230	0,160	0,017	227,147
	8	83,888	1500	gasolina/pode	19,74	14,60	60,00	57,60	-14,00		80,00	59,72	40,28	47,78	32,22	9,930	83,165	62,480	0,120	0,014	168,265
FANG, 2014	1	50,380	1500	etanol/diesel	6,98	4,3	0,00	-60,00	-34,00		62,47	88,00	12,00	54,97	7,50	48,03	601,941	34,330	0,493	0,004	683,271
	2	50,380	1500	etanol/diesel	6,98	4,3	0,00	-60,00	-32,00		61,89	88,00	12,00	54,47	7,43	43,09	605,182	31,300	0,677	0,005	686,511
	3	50,380	1500	etanol/diesel	6,98	4,3	0,00	-60,00	-30,00		61,75	88,00	12,00	54,34	7,41	44,11	602,302	31,470	0,929	0,005	683,631
	4	50,380	1500	etanol/diesel	6,98	4,3	0,00	-60,00	-28,00		62,76	88,00	12,00	55,23	7,53	48,76	602,865	35,360	0,988	0,006	684,194
	5	50,380	1500	etanol/diesel	9,89	6,1	0,00	-60,00	-32,00		84,88	88,00	12,00	74,70	10,19	27,32	627,380	12,450	0,188	0,003	708,710
	6	50,380	1500	etanol/diesel	9,89	6,1	0,00	-60,00	-30,00		82,50	88,00	12,00	72,60	9,90	26,17	610,078	12,170	0,350	0,003	691,408
	7	50,380	1500	etanol/diesel	9,89	6,1	0,00	-60,00	-28,00		81,97	88,00	12,00	72,14	9,84	27,13	602,408	13,760	0,420	0,004	683,738
	8	50,380	1500	etanol/diesel	9,89	6,1	0,00	-60,00	-26,00		81,45	88,00	12,00	71,68	9,77	25,06	603,690	11,620	0,661	0,004	685,020
	9	50,380	1500	etanol/diesel	9,89	6,1	0,00	-60,00	-24,00		81,10	88,00	12,00	71,37	9,73	22,78	605,815	9,970	0,970	0,004	687,145
	10	50,380	1500	etanol/diesel	9,89	6,1	0,00	-60,00	-22,00		80,59	88,00	12,00	70,92	9,67	22,62	603,791	8,770	1,359	0,004	685,120
	11	50,380	1500	etanol/diesel	9,89	6,1	0,00	-60,00	-20,00		84,14	88,00	12,00	74,04	10,10	25,70	622,052	13,100	1,748	0,004	703,382
	12	50,380	1500	etanol/diesel	12,49	7,7	0,00	-60,00	-26,00		108,10	88,00	12,00	95,13	12,97	24,88	637,865	11,170	0,468	0,003	719,195
	13	50,380	1500	etanol/diesel	12,49	7,7	0,00	-60,00	-24,00		107,62	88,00	12,00	94,71	12,91	24,16	637,428	9,980	0,709	0,003	718,757
	14	50,380	1500	etanol/diesel	12,49	7,7	0,00	-60,00	-22,00		104,82	88,00	12,00	92,24	12,58	19,98	627,292	7,870	1,302	0,003	708,622
	15	50,380	1500	etanol/diesel	12,49	7,7	0,00	-60,00	-20,00		108,35	88,00	12,00	95,34	13,00	20,80	648,374	8,050	1,634	0,003	729,704
	16	50,380	1500	etanol/diesel	12,49	7,7	0,00	-60,00	-18,00		111,09	88,00	12,00	97,76	13,33	26,68	650,799	13,740	1,466	0,003	732,128
	17	50,380	1500	etanol/diesel	13,95	8,6	29,00	-60,00	-24,00		119,93	88,00	12,00	105,54	14,39	18,97	644,720	7,680	0,129	0,001	726,050
	18	50,380	1500	etanol/diesel	13,95	8,6	29,00	-60,00	-22,00		116,32	88,00	12,00	102,36	13,96	16,92	628,996	6,020	0,222	0,001	710,326
	19	50,380	1500	etanol/diesel	13,95	8,6	29,00	-60,00	-20,00		112,20	88,00	12,00	98,74	13,46	14,75	609,146	5,290	0,259	0,001	690,475
	20	50,380	1500	etanol/diesel	13,95	8,6	29,00	-60,00	-18,00		112,67	88,00	12,00	99,15	13,52	16,02	608,769	6,400	0,284	0,001	690,099
	21	50,380	1500	etanol/diesel	13,95	8,6	29,00	-60,00	-16,00		116,32	88,00	12,00	102,36	13,96	16,19	628,840	6,585	0,252	0,001	710,169
	22	50,380	1500	etanol/diesel	13,95	8,6	29,00	-60,00	-14,00		122,38	88,00	12,00	107,70	14,69	19,80	653,416	10,400	0,209	0,001	734,746
	23	50,380	1500	etanol/diesel	12,49	7,70	0,00	-60,00	-18,00		103,00	88,00	12,00	90,64	12,36	73,750	541,517	20,944	1,290	0,003	622,846
	24	50,380	1500	etanol/diesel	13,95	8,60	29,00	-60,00	-14,00		113,00	88,00	12,00	99,44	13,56	56,640	558,101	13,968	0,270	0,001	639,430

1	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-43,99	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	3,956	204,961	9,887	0,021	325,480
2	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-43,09	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	3,565	208,795	7,696	0,021	329,314
3	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-40,97	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	3,217	212,095	5,817	0,042	332,615
4	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-38,06	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	3,130	213,166	5,191	0,084	333,685
5	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-35,00	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	3,130	213,985	4,670	0,168	334,504
6	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-9,64	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	3,261	211,560	6,130	1,832	332,079
7	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-7,01	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	3,739	209,441	7,174	1,305	329,960
8	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-5,92	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	4,130	207,246	8,322	0,968	327,765
9	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-4,99	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	4,435	205,465	9,261	0,779	325,985
10	82,400	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	80,00	35,00	-3,58	60,00	85,47	14,53	51,28	8,72	4,696	201,925	11,348	0,568	322,444
11	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-38,46	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,478	214,135	9,678	0,021	340,377
12	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-36,03	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,304	216,768	8,113	0,021	343,010
13	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-32,51	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,261	219,107	6,652	0,063	345,349
14	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-29,91	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,130	219,893	6,235	0,126	346,135
15	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-26,07	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,217	220,134	6,026	0,316	346,377
16	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-11,00	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	3,522	219,025	7,174	2,000	345,268
17	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-9,00	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	3,870	217,857	7,696	1,410	344,100
18	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-6,98	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,044	215,060	9,365	1,032	341,303
19	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-4,96	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,478	211,839	11,139	0,716	338,081
20	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-26,89	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	6,217	215,367	13,748	0,000	347,333
21	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-22,76	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	5,652	218,228	12,287	0,000	350,194
22	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-20,04	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	5,043	223,592	9,261	0,105	355,558
23	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-14,84	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	4,304	227,447	7,278	0,653	359,413
24	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-12,08	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	4,174	227,741	7,174	0,758	359,707
25	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-10,08	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	4,261	226,833	7,696	1,158	358,799
26	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-8,98	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	5,000	223,472	9,365	0,589	355,438
27	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-8,03	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	5,217	219,318	11,870	0,463	351,284
28	76,052	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	90,00	35,00	-6,78	60,00	96,15	3,85	57,69	2,31	5,652	216,752	13,226	0,316	348,718
29	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-38,75	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,586	212,468	10,670	0,061	338,710

LUU, 2014

30	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-35,93	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,379	216,635	8,150	0,060	342,877
31	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-32,39	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,483	219,095	6,518	0,099	345,338
32	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-30,03	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,069	220,207	6,074	0,180	346,449
33	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-26,21	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,379	219,664	6,222	0,323	345,907
34	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-11,06	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	3,552	219,792	6,667	1,985	346,035
35	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-9,01	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	3,965	218,449	7,259	1,407	344,691
36	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-7,11	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,069	216,945	8,150	1,034	343,187
37	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	35,00	-3,59	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	5,414	213,507	9,482	0,827	339,749
38	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-36,05	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,069	215,318	9,185	0,060	341,561
39	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-33,00	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,172	216,845	8,148	0,079	343,087
40	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-30,19	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,275	217,906	7,407	0,077	344,149
41	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-28,12	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,483	218,396	6,963	0,138	344,638
42	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-24,16	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,069	218,112	7,407	0,177	344,355
43	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-20,03	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	4,172	218,707	6,963	0,258	344,949
44	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-12,10	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	8,621	212,861	7,852	0,584	339,103
45	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-10,21	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	9,552	209,369	9,482	0,397	335,611
46	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-9,19	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	10,276	206,317	10,963	0,335	332,560
47	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	40,00	-7,16	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	12,034	199,903	13,926	0,230	326,146
48	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	45,00	-25,14	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	12,862	192,783	17,930	0,075	319,026
49	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	45,00	-20,12	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	11,000	197,213	16,296	0,134	323,455
50	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	45,00	-19,23	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	10,379	199,231	15,407	0,195	325,473
51	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	45,00	-16,04	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	10,793	197,652	16,148	0,256	323,895
52	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	45,00	-14,25	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	11,207	195,609	17,185	0,255	321,851
53	79,099	1500	n-butanol/biodiesel	12,85	9,50	85,00	45,00	-11,16	60,00	90,81	9,19	54,49	5,51	11,931	194,186	17,630	0,171	320,428