

# APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE SUPERFÍCIE AQUECIDA EM MOTORES DE COMBUSTÃO ESPONTÂNEA COM UTILIZAÇÃO DE ETANOL

Vinícius Fernandes dos Santos Moreal, Rafael Ferreira de Carvalho,  
Clayton B. Zabeu, Renato Romio

IMT - Instituto Mauá de Tecnologia

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo realizar a análise da viabilidade técnica do uso do etanol em motores a combustão espontânea utilizando a técnica da superfície aquecida. Hoje em dia os assuntos mais discutidos são quais os caminhos para diminuir a emissão de gases poluentes e formadores de efeito estufa emitidos por veículos e como desenvolver motores mais eficientes. Este trabalho visa estudar uma solução para esses dois assuntos: utilizar um combustível de fonte renovável e um motor que, devido a uma razão de compressão maior, apresente maior eficiência comparada aos motores ciclo Otto utilizados majoritariamente na frota de veículos leves.

Utilizando-se como base para o presente estudo o motor SDE 1,3l da General Motors e uma central de gerenciamento eletrônico aberta adaptada adequadamente ao motor, foi desenvolvida uma calibração inicialmente com diesel como combustível, e após o funcionamento estável com esse combustível, passou-se ao uso de etanol na rotação de torque (1750 rpm a plena carga). O motor foi instalado em um banco de ensaio dinamométrico localizado no Instituto Mauá de Tecnologia, sendo instrumentado com termopares, medidores de vazão de combustível e sensores de pressão e incluindo o uso de uma vela incandescente com sensor de pressão integrado. Medições de desempenho foram realizadas e comparação entre resultados com o motor utilizando os dois combustíveis foi conduzida.

Ao final dos testes realizados obteve-se o torque máximo do motor operando com etanol semelhante ao operando com diesel. Foi possível obter-se uma eficiência global 10% maior com a utilização do etanol. Infere-se a partir desses resultados que a utilização do etanol em motores a combustão espontânea, utilizando a vela incandescente como ponto quente, nas condições estudadas é viável tecnicamente.

## 1. APLICABILIDADE

Motor de combustão interna aplicado em veículos de passeio e pequenos comerciais.

## 2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar a potencial utilização de etanol (combustível renovável) em motores de combustão espontânea (ciclo Diesel) e com o auxílio do ponto quente (vela incandescente), funcionando de forma estável e satisfatória e avaliar seu rendimento. A

investigação proposta busca melhorar a compreensão sobre o processo de ignição induzido pela vela incandescente na câmara de combustão de motores do ciclo Diesel, a fim de desenvolver uma estratégia de ignição destes motores funcionando com etanol hidratado para otimizar o rendimento no uso deste combustível.

### 3. INTRODUÇÃO

#### 3.1 MÉTODO DO PONTO QUENTE

O processo de combustão que tradicionalmente se desenvolve em um motor de ignição espontânea que utiliza óleo diesel como combustível não é diretamente aplicável a combustíveis que apresentem baixo número de cetanas como o etanol. Para esse tipo de combustível, a combustão não se inicia espontaneamente no interior do cilindro sem que aditivos promovedores de autoignição (baseados em compostos nitrosos ou poli-etileno-glicol) ou altíssimas razões de compressão sejam utilizados. Uma forma alternativa de se iniciar a combustão de etanol é por meio do contato de gotas do combustível a uma superfície aquecida. Essa superfície aquecida pode ser gerada em uma vela incandescente localizada no interior da câmara de combustão.

A tecnologia começou a ser avaliada em meados da década de 1970 por vários pesquisadores com o objetivo de substituir os combustíveis derivados de petróleo, no contexto da crise mundial de escassez e preços elevados desta matéria-prima. Os resultados se mostraram promissores do uso de uma superfície aquecida no interior da câmara de combustão de um motor do ciclo Diesel, formada por uma placa de material isolante enrolada com algumas espiras de um filamento de 0,5mm de espessura. O motor monocilíndrico funcionou com metanol e etanol e inaugurou uma nova direção para os estudos de motores de ignição por compressão usando álcool como combustível. Nos testes daquela época, já foram utilizadas velas incandescentes especiais de maior durabilidade, controladas eletronicamente [1].

Esta tecnologia, que utiliza a vela incandescente para a ignição de combustível de base alcoólica, foi aplicada pelo IMT nos anos 1980 no contexto do “Projeto Metanol”, desenvolvido sob o patrocínio da CESP – Companhia Energética do Estado de São Paulo. Esta tecnologia foi designada de forma simplificada de “Ponto Quente”. Naquela oportunidade a tecnologia mostrou ser bastante promissora, permitindo a aplicação de M100 (100% álcool metílico ou metanol) em caminhões leves com razoável eficiência.

Na época destas primeiras avaliações, não havia equipamentos para estudo mais aprofundado do processo de ignição e propagação de chama na câmara de combustão, como a medição de grandezas indicadas e o diagnóstico por imagens. Não estavam vigentes no Brasil legislações de emissões gasosas rigorosas.

Mais recentemente, pesquisadores alemães da Universidade Técnica de Aachen e da FEV GmbH. [2] realizaram estudos sobre a tecnologia que usa a vela incandescente para auxiliar na ignição do etanol, executados em uma câmara de volume constante, que simula as condições de temperatura e pressão por ocasião da injeção de combustível de um motor do ciclo Diesel. Os estudos foram feitos através de imagens de alta velocidade para avaliar a ignição e a propagação da chama de etanol com o uso da vela incandescente.

Os resultados mostraram que o uso da vela incandescente fornece condições estáveis de ignição do etanol nas condições de partida a frio e identificaram ainda os principais parâmetros que influenciam no mecanismo de ignição.

Considerando o modelo da combustão do *spray* de combustível em motores de ignição por compressão, observa-se ao redor do núcleo líquido do *spray*, a formação de uma camada limite com uma mistura rica de vapor de combustível e ar na qual se estabelece uma chama de pré-mistura, como mostra região envolvida por uma faixa azul-claro na Figura 1. É nesta região que a superfície aquecida da vela incandescente deve ser posicionada para elevar a temperatura e garantir a ignição da mistura de ar e etanol hidratado [3].

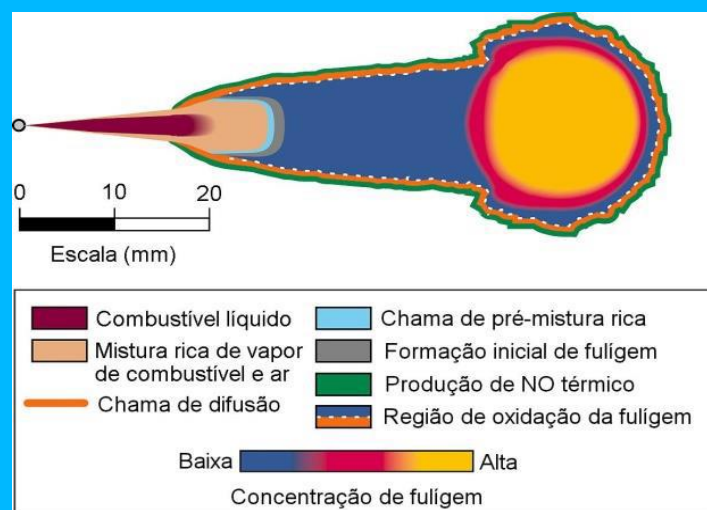


Figura 1 – Combustão totalmente desenvolvida de um *spray* diesel [3].

Na Figura 2 pode-se observar, conforme Becker (2012) [4], uma ilustração básica mostrando a disposição da vela incandescente no interior da câmara de combustão.



Figura 2 – Disposição da vela incandescente na câmara de combustão [4]

Na partida, o motor diesel necessita comprimir o ar admitido e aquecê-lo ao redor de 900°C para que se inicie a combustão. Quanto mais rápido se aquece a câmara de combustão, mais rápida é a partida do motor. Entre os motores a diesel há diferentes câmaras de

combustão, o que dificulta que a temperatura seja a mesma para todos os motores. Para que o motor entre em funcionamento rapidamente reduzindo a emissões de poluentes é necessário aquecer a câmara de combustão com auxílio da vela incandescente.

O princípio básico de uma vela de incandescência moderna consiste na combinação de uma bobina de aquecimento e uma bobina de regulação num elemento de resistência comum único. A bobina de aquecimento é fabricada em material resistente a temperaturas elevadas cuja resistência elétrica é amplamente independente da temperatura. Juntamente com a parte frontal da sonda de incandescência, forma a zona de aquecimento. Com os diferentes materiais, comprimentos e diâmetros e com as diferentes espessuras de fios para a bobina de aquecimento e bobina de regulação é possível alterar os tempos de aquecimento e as temperaturas de incandescência da vela, de acordo com os respectivos requisitos do motor. A Figura 3 mostra esquematicamente os componentes citados.

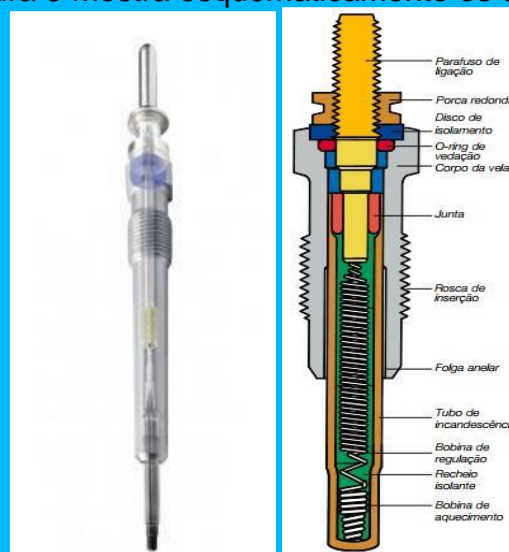


Figura 3 – Vela de incandescente.

Um estudo experimental de uma ignição assistida com a vela incandescente e combustão com metanol puro (M100) foi conduzido usando uma tecnologia moderna, motor 4 tempos, Caterpillar ciclo Diesel pesado, que foi modificado para fornecer um maior acesso ótico dentro da câmara de combustão. Para fins comparativos, os resultados são apresentados com o CN45 diesel referência com número de cetano 45. A 1200 rpm, foram estudadas as condições de operações parciais. Foram utilizadas imagens diretas de luminosidades da câmara de combustão conforme mostrado na figura 4, que foram utilizadas junto com as análises termodinâmicas e os dados de pressão do cilindro para identificar diferenças entre a ignição e a combustão característica dos dois combustíveis. Os números nos vértices superiores direitos de cada imagem indicam a posição angular e os localizados nos vértices inferiores direitos trazem os ganhos de luminosidade da câmara em cada posição angular. Enquanto que CN45 é facilmente auto-ignitado nas condições de estudo, o M100 não. A assistência da vela incandescente com M100 foi utilizada para ser fortemente dependente da temperatura e da proximidade com a vela incandescente [5].



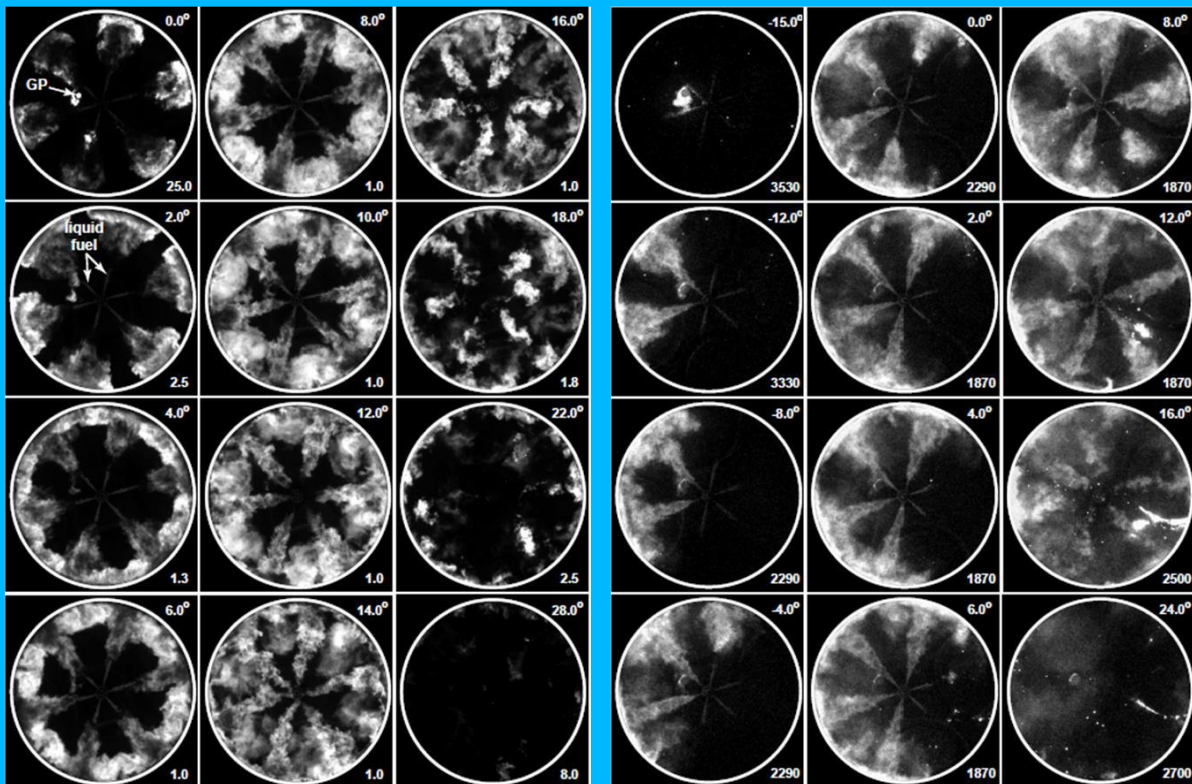


Figura 4 – Imagens de operação com CN45 (esquerda) e M100 (direita). Adaptado de [5].

A sequência de imagens na figura 4 evidencia que a ignição com M100 ocorre inicialmente nas proximidades da vela incandescente, seguindo a propagação da combustão primeiramente para os dois jatos mais próximos da vela, depois para os dois jatos adjacentes, e por fim para os dois últimos jatos emanando dos 6 furos. Nota-se também que houve uma considerável diferença no ganho da câmera empregado no caso do M100, denotando que a luminosidade da combustão do M100 foi consideravelmente menor – uma potencial indicação de menor formação de particulado (radiação térmica).

Os autores ainda associam os três picos presentes na curva de taxa de liberação de calor como sendo correspondentes aos pares de eventos.

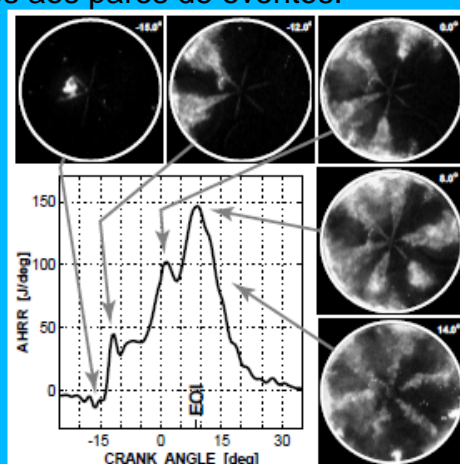


Figura 6 – Picos na curva de taxa de liberação de calor. Adaptado de [5].

### 3.2 PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES

Das referências e estudos já realizados podem ser destacados os seguintes tópicos:

- A importância da vela incandescente, utilizada para gerar o ponto quente, ignitando o combustível;
- A influência da potência útil da vela incandescente e de sua localização em relação aos jatos de combustível;

O trabalho experimental a seguir cobrirá esses tópicos citados.

### 3.3 MATERIAIS E MÉTODOS / DESENVOLVIMENTO

Os motores utilizados na pesquisa foram fornecidos pela General Motors, sendo sua descrição apresentada na tabela 1 descrita abaixo. Os dois motores recebidos são do mesmo modelo (figura 7).

Tabela 1 – Dados do motor ensaiado

Motor Diesel SDE 1,3L	
Número de cilindros	4 em linha
Número de válvulas	16
Deslocamento	1248 cm <sup>3</sup>
Máxima potência	51 kW @ 4000 rpm
Máximo torque	180 Nm @ 1750 rpm
Diâmetro / Curso	69.6 mm / 82 mm
Ordem da injeção	1-3-4-2
Razão de compressão	18,1 ± 0.4:1
Marcha lenta	830 ± 50 rpm
Emissão de CO <sub>2</sub>	123 g/km
Controle de válvula	DOHC com tucho hidráulico
Sistema de injeção	<i>Common Rail</i>



Figura 7 – Motor GM SDE 1,3L para análise

### 3.4 VELAS INCANDESCENTES MODIFICADAS E VELA COM TRANSDUTOR DE PRESSÃO

Como visto anteriormente a vela incandescente é um importante componente do experimento, pois ela gera a superfície aquecida para a análise do funcionamento com etanol e quando dispõe de um transdutor de pressão acoplado serve para monitorar a pressão de combustão e auxiliar a calibração do motor tanto com diesel ou etanol.

Foram utilizadas diferentes configurações da vela sendo elas descritas como A, B, C e D mostradas na figura 8.



Figura 8 – Vela configuração A (esquerda), configurações B & C (centro) e configuração D (direita);

A configuração 'A' é uma vela de outro veículo usinada para proporcionar 6mm a mais de protrusão na câmara em relação à vela original, a fim de proporcionar uma incidência do jato do *spray* próxima à vela com o uso do etanol. A partir dessa configuração foi usinada uma rosca para acoplar os componentes na configuração 'B' e 'C' sendo eles com propósito de aumentar a área de contato e tempo de residência do combustível conforme verificado por (Mueller, 2004), onde uma proteção foi acoplada na vela incandescente melhorando a combustão com uso de metanol.

A configuração 'D' por sua vez dispõe de um transdutor de pressão que ao mesmo tempo de funcionamento para aquecimento da câmara faz a leitura da pressão de combustão dentro da câmara que é essencial para o processo de calibração com diesel e o etanol.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS COMPARANDO DIESEL E ETANOL ANIDRO

Inicialmente foi realizada a calibração do motor com diesel para obter um *baseline* e realizar aquisições de dados para comparação futura com o etanol anidro.

Neste tópico são apresentadas as curvas de consumo e consumo específico de combustível, temperaturas de escapamento e ar admitido pelo motor, avanço de injeção e de rendimento global. Durante o estudo foram realizados testes na condição de 1750 rpm – velocidade angular original de torque máximo. Todos os pontos aqui mencionados foram realizados nessa rotação em função do torque, verificando o comportamento do motor em cada carga diferente utilizando os dois tipos de combustível. Quando o motor estava em funcionamento com etanol, houve a necessidade de utilizar diferentes configurações e adaptações no motor para alcançar cargas mais baixas. Portanto os dados obtidos com etanol não representam uma curva contínua. As combinações de configuração estão representadas da seguinte forma:

- Configuração 1: vela configuração “A” (figura 8);
- Configuração 2: vela configuração “C” (figura 8);
- Configuração 3: vela configuração “C” (figura 8), aquecedor de ar na admissão, ligação de saída do turbo-compressor direta no coletor de admissão e uso de borboleta mecânica para restrição da vazão de ar na admissão.

A figura 9 mostra o gráfico obtido através dos dados da tabela 2, do consumo de combustível em função do torque do motor para os dois combustíveis utilizados. Nota-se um consumo de etanol ligeiramente maior nessas condições devido a esse combustível possuir um menor poder calorífico em relação ao óleo diesel, sendo necessário injetar um volume maior para compensar essa diferença.

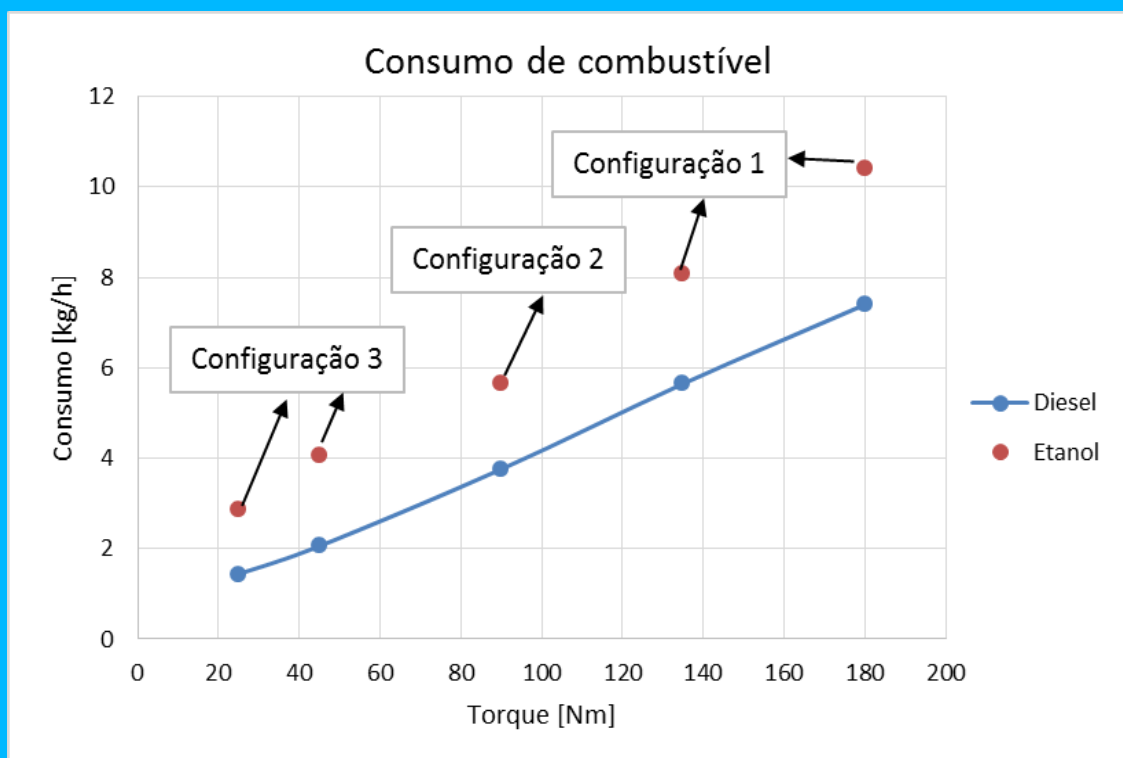


Figura 9 – Consumo de combustível com etanol e óleo diesel.

Tabela 2 – Consumo de combustível com óleo diesel e com etanol anidro.

Torque	Diesel		Etanol anidro	
	Consumo	Desvio padrão	Consumo	Desvio padrão
Nm	kg/h	-	kg/h	-
25	1,42	0,01	2,98	0,09
45	2,08	0,03	4,05	0,03
90	3,76	0,01	5,54	0,09
135	5,66	0,01	7,97	0,15
180	7,42	0,06	10,49	0,07



A figura 10 mostra o gráfico do consumo específico de combustível em função do torque do motor utilizando diesel e etanol utilizando os dados da tabela 3. Esse parâmetro mostra a eficiência com que o motor transforma a energia química do combustível em trabalho útil. Pode-se verificar um maior valor de consumo específico utilizando etanol principalmente em baixas cargas, pois para o funcionamento estável do motor foi utilizada uma estratégia que permitisse operar o motor de forma estável em condições extremamente diluídas, devido a potência da vela incandescente não ser suficiente para manter o motor em funcionamento. Vale ressaltar que as condições de baixas cargas com etanol ainda estão em início experimental podendo ser otimizadas.

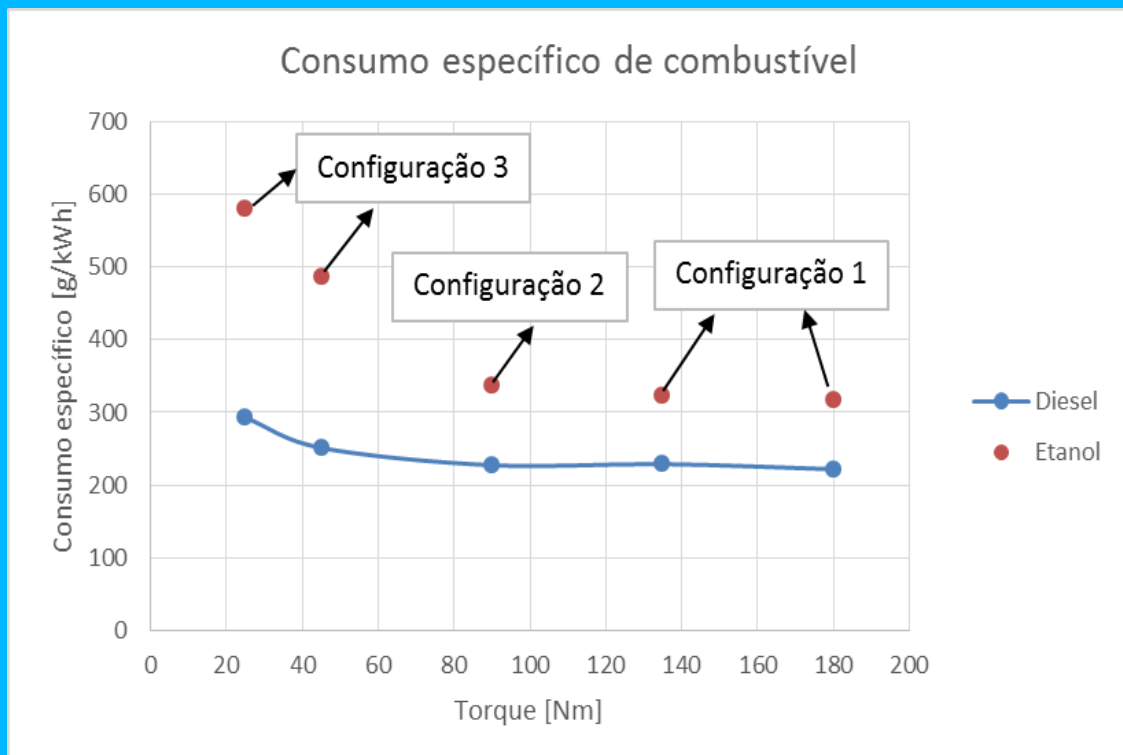


Figura 10 – Consumo específico de combustível com etanol anidro e diesel.

Tabela 3 – Consumo específico de combustível com etanol anidro e diesel

Torque	Diesel		Etanol anidro	
	Consumo específico	Desvio padrão	Consumo específico	Desvio padrão
Nm	g/kWh	-	g/kWh	-
25	293,0	4,6	618,3	30,9
45	251,4	3,3	484,0	3,9
90	227,5	1,1	337,5	3,2
135	229,1	0,9	323,0	4,6
180	221,9	2,1	316,1	2,4

A figura 11 mostra o gráfico obtido através dos dados da tabela 4, do rendimento global em função do torque com diesel e etanol anidro, admitindo-se valores de PCI de 41,95MJ/kg para diesel e 27MJ/kg para etanol anidro. Esse rendimento é o resultado do aproveitamento de energia que está sendo gerada pela combustão. O valor deste aproveitamento pode ser

encontrado dividindo-se a potência mecânica medida no dinamômetro pela taxa de energia fornecida ao motor, que pode ser calculada pelo produto do consumo de combustível pelo seu PCI como descrito na equação abaixo:

$$\eta_{gl} = \frac{\text{Potência de eixo}}{\text{Consumo horário de combustível} \cdot \text{PCI}} \quad (1)$$

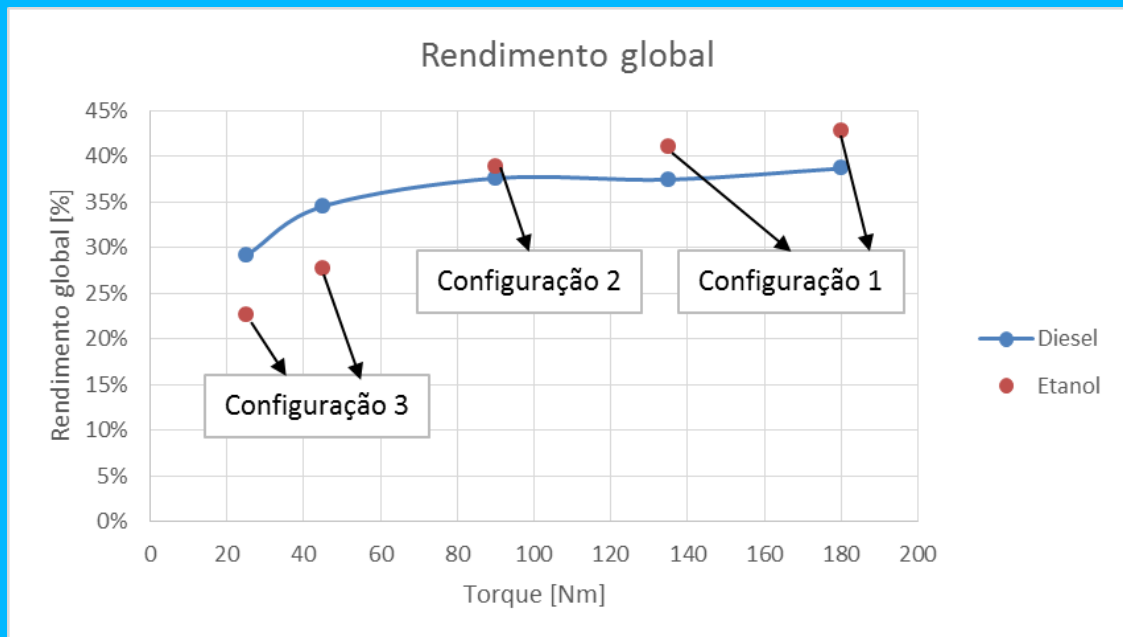


Figura 11 – Rendimento global com etanol anidro e óleo diesel.

Tabela 4 – Rendimento global com etanol e óleo diesel

	<b>Diesel</b>	<b>Etanol anidro</b>
Torque	$\eta$ global	$\eta$ global
Nm	%	%
25	29%	22%
45	34%	28%
90	38%	40%
135	37%	42%
180	39%	42%

É possível notar que, em altas cargas, o rendimento global do motor é maior com etanol do que com diesel. Já em baixas cargas o contrário acontece, fato provavelmente explicado pela restrição de ar imposta pelo uso de um corpo de borboleta na configuração 3. Essa restrição adicional no fluxo de ar – não existente na configuração original do motor – aumentou o trabalho de bombeamento e influenciou diretamente no rendimento global, mas emprego de velas com maiores potências podem proporcionar a ignição da mistura sem, talvez, a necessidade de restrição no sistema de admissão.

Um outro ponto importante de nota foi a redução do teor de fuligem em todos os pontos de operação com etanol anidro, fato esse alinhado com um das conclusões do trabalho de Mueller [5].

## 4.2 ANÁLISE DO PONTO DE TORQUE MÁXIMO

Comparações entre o desempenho do motor com ou sem a vela incandescente foram realizadas e os pontos de operação apresentados neste trabalho foram escolhidos de acordo com os parâmetros estipulados ou fornecidos pela montadora para o motor original (ciclo Diesel).

Foram realizadas aquisições com o motor em plena carga na condição de torque máximo (180 Nm a 1750 rpm) utilizando óleo diesel e após ajustes na calibração foi possível obter esses dados utilizando etanol anidro conforme demonstrado na tabela 5. Em ambos os testes conseguimos manter um bom funcionamento do motor com torque e rotação estáveis.

Tabela 5 – Parâmetros obtidos no banco de provas

Parâmetros	Diesel	Etanol anidro
Potência (kW)	33,4	33,2
Torque (Nm)	181,3	180,4
Consumo (kg/h)	7,42	10,49
Débito (mm <sup>3</sup> /inj)	35,2	49,9
Consumo específico (g/kWh)	221,9	316,1
Temperatura de escapamento (°C)	461	443,7
PME (kgf/cm <sup>2</sup> )	17,87	17,78

Os dados obtidos através da calibração desenvolvida para o diesel foram considerados satisfatórios, pois o valor de referência de torque fornecido pelo fabricante foi atingido com consumo específico perto do usual. Para a mesma condição de torque com etanol as principais mudanças foram o ajuste no débito de combustível e tempo de injeção. Neste trabalho a calibração não foi voltada para atender aos níveis de emissões limitados pelas legislações, portanto não foi realizada a análise dos produtos de combustão, para nenhum dos combustíveis deixando assim esta análise para trabalhos futuros.

Com esses dados foi possível calcular o rendimento global do motor que é o resultado do aproveitamento de energia que está sendo gerado pela combustão. Para os valores de PCI já mencionados, calculou se o rendimento global para os dois combustíveis conforme apresentado na tabela 6, resultando em uma eficiência 9,8% maior para o caso com etanol.

Tabela 6 – Parâmetros para cálculo do rendimento global

	Diesel	Etanol anidro	Diferença %
PCI (MJ/kg)	41,95	26,81	-36,1%
Consumo (kg/h)	7,42	10,49	
Potência (kW)	33,4	33,2	
Rendimento global	38,7%	42,5%	+9,8%

Na figura 12 e 13 são mostradas as curvas de evolução de pressão na câmara (curvas verdes), taxas de liberação de calor (*heat release rate* em azul) e integrais do calor liberado (curvas brancas) e sinais de comando do injetor de combustível (curvas amarelas) que foram obtidos no *software* AVL Indicom utilizando a vela incandescente com sensor de pressão no 1° cilindro para a condição de 180Nm @ 1750 rpm.

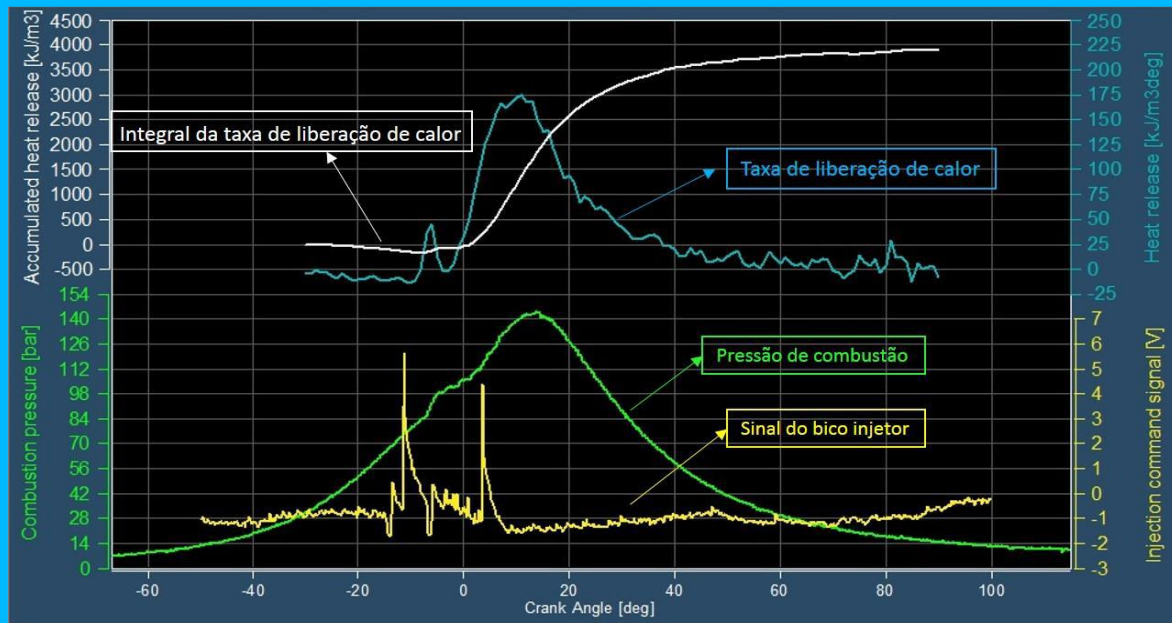


Figura 12 – Curvas obtidas utilizando óleo diesel.

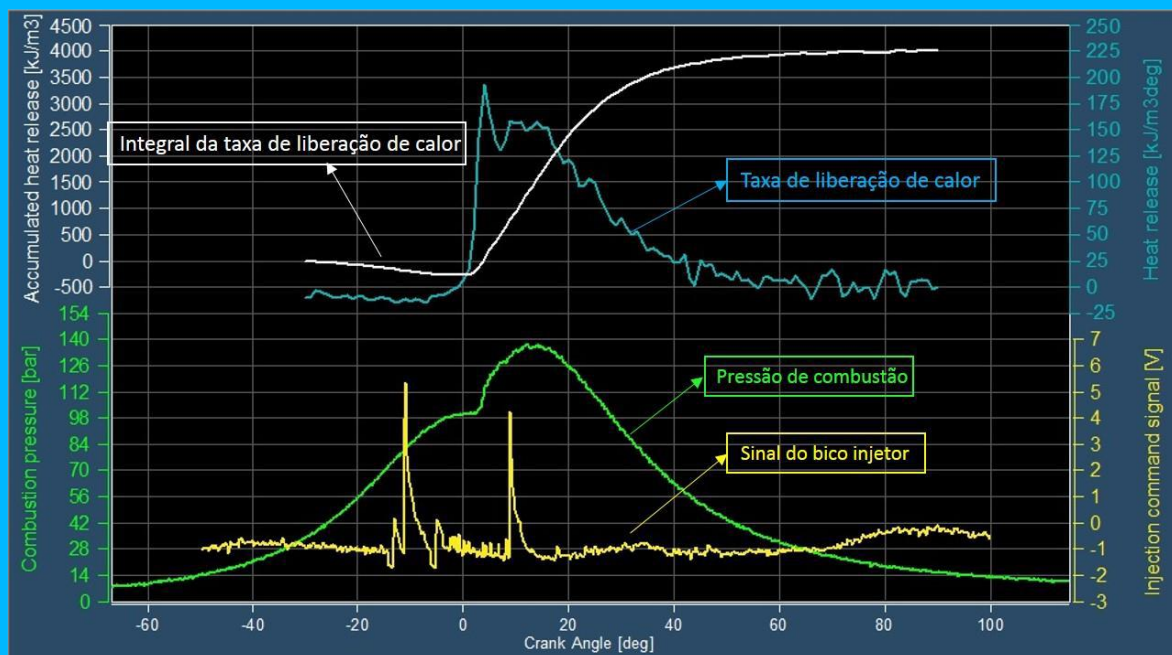


Figura 13 – Curvas obtidas utilizando etanol anidro.

Observa-se que, quando se opera o motor com etanol anidro, a taxa de liberação de calor é muito mais acentuada na região próxima ao ponto morto superior, indicando uma condição mais próxima da ideal (adição de calor isovolumetricamente). Esse fato pode ser melhor vislumbrado na figura 14, onde se pode verificar a maior inclinação da curva amarela de taxa de liberação de calor com etanol após o PMS.

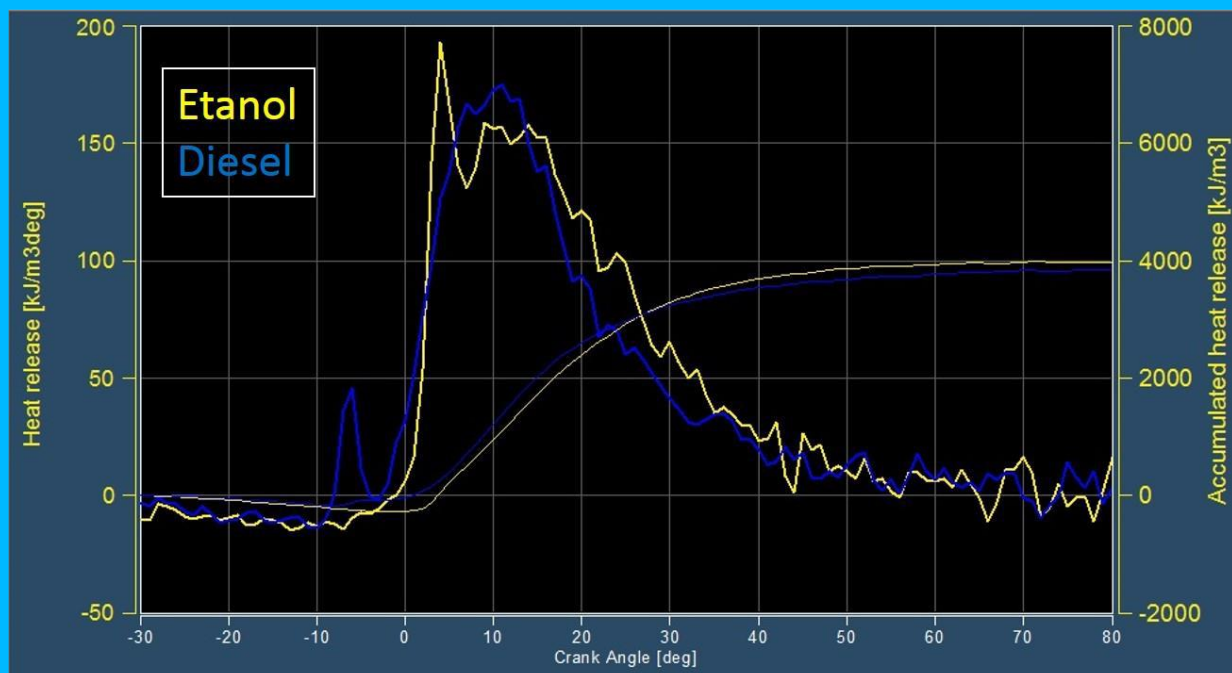


Figura 14 – Comparação da taxa de liberação de calor utilizando diesel e etanol anidro.

Outro ponto importante foi a constatação de que, mesmo havendo uma maior taxa de subida de pressão para o caso do etanol, o ruído observável quando se opera o motor com esse combustível é consideravelmente menor do que quando se opera com diesel – mesmo com as pré-injeções de combustível. Isso é provavelmente devido ao fato de que não se trata de uma forma convencional de combustão espontânea, caso em que a combustão abrupta da pré-mistura formada durante a fase inicial da injeção leva a altos valores de  $dp/d\alpha$  e, conseqüentemente, a altos níveis de ruído.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O estudo experimental foi realizado no laboratório de motores do IMT com o funcionamento de um motor de compressão espontânea utilizando diesel e posteriormente etanol anidro como combustível para que os resultados fossem, então, comparados entre si e se pudesse demonstrar a viabilidade de se utilizar um combustível de fonte renovável em um motor com maior rendimento global.

Após testes realizados com o motor em plena carga na condição de torque máximo, foram obtidos valores próximos de torque (180 Nm/17,5bar PME a 1750 rpm) e funcionamento estável com ambos os combustíveis. O ponto interessante é a diferença do poder calorífico de cada combustível (41,95 MJ/kg para o óleo diesel e 26,81 MJ/kg para o etanol) indicando que com o uso do etanol é inserida uma menor energia de entrada para o motor recebendo praticamente o mesmo trabalho de saída.

Com esses resultados foi evidenciada uma melhor eficiência energética quando utilizado o etanol, apresentando um rendimento global ~10% maior em relação a utilização do óleo diesel. O fator determinante para a obtenção da melhor eficiência é a velocidade de reação e queima do etanol ser mais rápida, ocasionando um melhor aproveitamento de energia,



comprovando assim a viabilidade da utilização do etanol em motores de combustão espontânea nas condições do estudo.

Os ensaios foram realizados sempre na rotação de 1750 rpm (rotação de torque). Notou-se que, em condições de cargas elevadas, a potência máxima requerida da vela incandescente não era de suma importância para o funcionamento do motor. Entretanto, em cargas mais baixas, observou-se que a potência elétrica – e certamente a térmica – das velas era um fator decisivo para uma operação estável do motor. Uma possível explicação para esse fenômeno é o fato de que em altas cargas, o calor absorvido pelas velas durante a combustão é suficiente para mantê-las aquecidas a ponto de ignitar o combustível no ciclo seguinte, coisa que em baixas cargas aparentemente não acontece. Isso é um tópico que pode ser explorado em trabalhos futuros.

Para conseguir operar o motor em cargas parciais foi utilizada uma proteção em torno da vela, conhecida como *shroud*. Essa proteção foi analisada por Mueller (2004) e segundo os estudos realizados com essa proteção é possível fazer com que gotas de etanol permaneçam mais tempo em contato com a área aquecida iniciando assim a combustão. Essa proteção tem uma grande importância para o funcionamento em cargas parciais e rotações mais baixas. Durante a calibração do mapa de injeção do etanol, assim como no diesel, foram utilizadas duas injeções (pré-injeção e injeção principal), para a calibração do etanol foi verificado que mesmo com a pré-injeção não há liberação de calor antes do PMS no caso do etanol, porém sem a pré-injeção a combustão não é estável e o motor não tem seu funcionamento correto – forte indicação de que a formação de uma pré-mistura do etanol com o ar admitido tem um papel importante no desenvolvimento da combustão.

A redução observável de material particulado e fuligem no escapamento do motor em todas as condições testadas com etanol é um fato que pode suscitar sua aplicação sem a necessidade de filtro de material particulado. Entretanto é necessário que avaliações adicionais de emissões de outros poluentes como NOx e etanol não queimado.

Dentro do objetivo proposto pelo estudo, os resultados obtidos demonstram a possibilidade de funcionamento de um motor de combustão espontânea utilizando etanol se aditivado e sem necessidade de aumento de razão de compressão do motor e, além disso, apresentando maior eficiência energética, o que pode comprovar de forma satisfatória a viabilidade do estudo.

Sugere-se que, para trabalhos futuros, sejam estudados impactos da potência de velas incandescentes, nível de *swirl* na câmara e uso de maior número de pré-injeções na eficiência energética global do motor e em suas emissões.

## 6. REFERÊNCIAS

[1] NAGALINGAM, B.; SRIDHAR, B. L.; PANCHAPAKESAN, N. R.; GOPA-LAKRISHNAN, K. V.; B. S. MURTHY, B. S.; **Surface Ignition Initiated Combustion of Alcohol in Diesel Engines — A New Approach**, SAE Paper 800262, 1980.

[2] JAKOB, M; PISCHINGER, S; ADOMEIT, P; KOLBECK, A. - **Glow Plug Ignition of Ethanol Fuels under Diesel Engine Relevant Thermodynamic Conditions** – 2010 SAE

International, 2011.

[3] ARGACHOY, C.; PIMENTA, A. P. **Phenomenological model of particulate matter emission from direct injection diesel engines**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Brazil, 2005, v. 27, n. 3, p. 266-273.

[4] BECKER, M. **MTZ - Motortechnische Zeitschrift**, Wiesbaden, DE, Vol 69, no. 6, 1 June, 2012.

[5] MUELLER, C. J.; MUSCULUS, M. P. - **Glow Plug Assisted Ignition and Combustion of Methanol in an Optical DI Diesel Engine** – SAE 2001-01-2004, 2001.