

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GERAIS

A partir do fim da década de 70 o mercado brasileiro de combustíveis e de veículos leves passou a ter características únicas em relação aos demais países do mundo devido ao uso do etanol como combustível automotivo. Em um primeiro momento foi adicionado etanol anidro à gasolina e também foram desenvolvidos veículos movidos a etanol hidratado. Atualmente, pela aplicação em larga escala de veículos com tecnologia flexível, que permite o funcionamento dos motores com gasolina C, etanol hidratado e quaisquer de suas misturas. Tal fato tem como consequência um número reduzido de publicações técnicas que tenham objetivos semelhantes a esta, destacando-se alguns trabalhos realizados por pesquisadores brasileiros, dados os maiores avanços do país no uso do etanol e da tecnologia flexível. Existe uma grande quantidade de trabalhos publicados no exterior que versam sobre as misturas de etanol à gasolina. No entanto, a revisão bibliográfica teve foco em publicações que contemplaram trabalhos experimentais com etanol anidro ou hidratado em motores, fornecendo características desses combustíveis e informações técnicas sobre o funcionamento de motores flexíveis.

2.2. ETANOL OU ÁLCOOL ETÍLICO

De acordo com PENIDO (1983), o etanol possui diversas características positivas para o uso como combustível automotivo no país, tais como ser renovável, possuir menor custo e ser produzido em larga escala no Brasil. O percentual de água classifica esse combustível como etanol anidro, com até 0,7% em massa de água e etanol hidratado, com 6,2% a 7,4% em massa de água (ANP, 2002). PENIDO (1983) também afirma que a quantidade ótima de água no etanol varia com o tipo de motor e sua aplicação. O percentual escolhido para hidratação do etanol no Brasil, segundo o autor, se baseou em dados econômicos, devido ao menor custo de produção do etanol hidratado frente ao etanol anidro, bem como técnicos, considerando-se principalmente a redução do poder calorífico do combustível gerada pela adição de água.

Como vantagens do etanol em comparação com a gasolina são citadas:

- maior octanagem, possibilitando a utilização de motores com taxas de compressão mais elevadas e;
- menor formação de depósitos de combustão devido ao menor número de ligações C – C, evitando o aumento excessivo da taxa de compressão pelo acúmulo de resíduos na câmara de combustão, o que poderia levar à ocorrência de detonação.

Também são listadas algumas desvantagens do etanol:

- menor poder calorífico, cerca de 70% do verificado na gasolina C;
- menor velocidade de combustão em relação à gasolina;
- alto calor latente de vaporização, favorecendo a condensação do combustível no coletor de admissão ou impedindo a vaporização do mesmo, gerando dificuldades na partida a frio do motor em baixas temperaturas. Segundo o autor, cada grama de etanol hidratado absorve 130% mais energia das paredes do coletor de admissão do que a mesma quantidade de gasolina. Enquanto a gasolina, quando passa da fase líquida para a gasosa, reduz a temperatura da mistura ar-combustível em cerca de 20°C, essa redução para o etanol fica em torno de 50°C;
- alto ponto inicial de vaporização, reduzindo a porcentagem de combustível vaporizado a temperaturas mais baixas e também gerando inconvenientes na partida a frio do motor;
- altas emissões de aldeídos, nocivos à saúde humana;
- ser solvente de borrachas e possuir alta corrosividade, demandando a aplicação de materiais mais resistentes no sistema de combustível com consequente aumento de custos.

Do ponto de vista do desempenho dos motores, as vantagens citadas por Penido (2003) são as seguintes:

- maior rendimento global, proporcionado pela maior octanagem do etanol que permite aumento da taxa de compressão;
- aumento da potência e do torque como consequência da elevação da taxa de compressão.

Já as desvantagens apresentadas pelo autor são:

- maior consumo de combustível devido ao poder calorífico reduzido;

- diminuição do rendimento mecânico, como consequência da maior força normal atuando sobre os pistões e seus componentes horizontais, aumentando os atritos no motor.

2.2.1. HIDRATAÇÃO DO ETANOL

Conforme PENIDO (1983), o etanol é um combustível higroscópico, ou seja, possui características naturais de absorção de água. A hidratação do etanol possui alguns inconvenientes como a diminuição do poder calorífico em relação ao etanol anidro, aumentando o consumo de combustível do motor, bem como a redução da inflamabilidade dos gases do combustível.

Por outro lado, a água contida no etanol hidratado, pelo seu elevado calor latente de vaporização, proporciona a esse combustível um aumento de sua capacidade antidetonante, permitindo que a taxa de compressão possa ser elevada, com impacto direto no aumento do rendimento térmico do motor.

2.3. TECNOLOGIA FLEXÍVEL

Devido ao aumento do preço do petróleo em 1975, os Estados Unidos adotaram um programa de redução de consumo de combustível (chamado “Corporate Average Fuel Economy”, CAFE) que impôs regras rígidas aos fabricantes de veículos, obrigando-os a desenvolver veículos mais econômicos. Porém, esse mesmo programa permitia algumas exceções para os fabricantes que oferecessem veículos movidos a combustíveis alternativos (o que, para os americanos, naquela época, era o metanol com 15% de gasolina, chamado M85). Como era difícil encontrar o M-85 nos postos de abastecimento, o que dificultava o comércio de veículos movidos exclusivamente a esse combustível, as montadoras americanas desenvolveram automóveis que podiam usar tanto gasolina como M85 – os chamados flex fuel. Mais tarde, com o crescimento da produção de etanol a partir do milho, os Estados Unidos abandonaram o uso do metanol e passaram a usar o etanol, E85 (JOSEPH JR, 2008).

A tecnologia flexível nasceu de pesquisas realizadas nos Estados Unidos e na Europa no final da década de 80, incentivada pela necessidade de solucionar o problema da falta de infraestrutura de abastecimento para o uso de metanol e

etanol, o que inviabilizava o uso e expansão desses combustíveis. O desenvolvimento dessa tecnologia possibilitou o uso do combustível formado pela mistura E85, estabelecido para facilitar a partida do motor do ciclo Otto em condições extremas de frio.

Trabalhos de pesquisa realizados no Brasil resultaram em uma concepção tecnológica superior a dos Estados Unidos e outros países. Enquanto os veículos flex fuel americanos eram derivados dos veículos à gasolina, podendo utilizar apenas E10 ou E85, no Brasil, os motores flexíveis foram concebidos e desenvolvidos a partir de conhecimentos adquiridos com os motores originais a etanol. A vantagem brasileira foi obtida em função da experiência com veículos a etanol, que possuem maiores taxas de compressão. Dessa forma, o conceito flexível brasileiro provou ser melhor em termos de redução de consumo de combustível e desempenho, permitindo o uso de gasolina com 20% de etanol anidro até 100 % de etanol hidratado, incluindo quaisquer misturas desses dois combustíveis.

Em 2003, a indústria automobilística iniciou a produção desses motores. A Volkswagen, em parceria com um de seus fornecedores de sistemas eletrônicos de injeção de combustível, a Magneti Marelli, foi a primeira montadora brasileira a lançar um veículo com esse conceito flexível no mercado brasileiro. Os veículos nacionais do tipo flexível possuem um módulo de injeção eletrônica que é capaz de gerenciar o funcionamento do motor para utilizar etanol hidratado e gasolina, misturados em qualquer proporção.

A produção de veículos flexíveis no Brasil, que foi de 48.178 unidades em 2003, subiu para 2.127.740 em 2009 (ANFAVEA, 2009). Em parte para atendimento à demanda, a produção de etanol brasileiro subiu de cerca de 14 bilhões de litros na safra 2003 / 2004, para aproximadamente 22 bilhões de litros na safra 2007/2008 (UNICA, 2009). Em 2009, o percentual de produção de veículos flexíveis representou 88,3% dos novos veículos produzidos no Brasil (ANFAVEA, 2009).

Conforme NIGRO *et al.*, o princípio de funcionamento da tecnologia flexível utilizada no país baseia-se no sensor do teor de oxigênio nos gases de escapamento (sonda lambda), o qual já era necessário para satisfazer os requisitos de emissões da fase L-3 do PROCONVE em veículos a gasolina. A mistura ar/combustível tem que ser mantida estequiométrica para que o catalisador de três vias possa reduzir drasticamente os HC, CO, NOx e aldeídos (RCHO). A função

da sonda lambda é informar à unidade de controle eletrônico do motor (ECU) para injetar mais ou menos combustível conforme a mistura esteja pobre ou rica (tenha menos ou mais combustível), de modo a mantê-la na estequiometria correta da combustão.

Para detectar com precisão o ponto de operação do motor (porcentagem de carga e rotação), existem também sensores que medem e informam à ECU tanto a rotação do motor como o fluxo de ar admitido. Os valores das relações estequiométricas ar/etanol e ar/gasolina são conhecidos e estão armazenados na memória da ECU. Esta por sua vez infere a quantidade de combustível que é injetada para manter a mistura ar/combustível estequiométrica por meio do tempo que os injetores permaneceram abertos. Dessa forma, pode-se calcular o teor de etanol no combustível líquido. Com base nesse teor calculado, controlam-se outros parâmetros de funcionamento do motor, como por exemplo, o avanço da centelha, a necessidade de injeção de gasolina na partida a frio, as quantidades injetadas para atender a resposta transitória do motor tanto a quente como a frio e as estratégias para melhorar a eficiência do catalisador.

Outro aspecto fundamental, para a rápida introdução e evolução da tecnologia flexível no Brasil, foi uma incorporação imediata dos desenvolvimentos anteriormente realizados nos motores a etanol, em termos de compatibilidade de materiais, grau térmico da vela de ignição, bomba e filtro de combustível e sistema de partida a frio, dentre outros.

A introdução da tecnologia de motores flexíveis no Brasil foi inicialmente baseada no conceito da não modificação do motor a gasolina original, de modo que, na primeira geração, a atenção foi quase que exclusivamente dedicada à funcionalidade do sistema e atendimento aos requisitos de emissões, com reduzida preocupação do consumo do etanol. A taxa de compressão do motor a gasolina C era mantida, e os ganhos de torque e potência quando utilizando etanol eram aproximadamente 2%.

Em uma segunda geração as taxas de compressão subiram cerca de um ponto em relação às de gasolina C, buscando-se um maior equilíbrio no desenvolvimento do motor para os dois combustíveis, com ganhos de potência e torque para o etanol, na faixa dos 3% a 4%. Também foi introduzido o uso de novos catalisadores e velas de ignição adequadas para as novas taxas de compressão.

Numa terceira geração, adotada em alguns modelos pelas montadoras com grande experiência no desenvolvimento de motores a etanol, as taxas de compressão se aproximaram bastante das máximas taxas admissíveis para o etanol com ganhos de torque para o etanol acima dos 5%.

A Tabela 1, adaptada da apresentação feita por representante da Volkswagen no 14º Ethanol Summit – 2009 resume, na visão da montadora, como tem ocorrido a evolução da tecnologia. Observe-se que na 4ª geração da Volkswagen já existe um sistema de partida a frio com pré-aquecimento do etanol, o que dispensa a necessidade do tanque auxiliar de gasolina.

Tabela 2.1 – Evolução da Tecnologia Flexível na visão da Volkswagen

| Geração | Entrada no Mercado | Taxa de Compressão do Motor | Ganho de Potência com Etanol | Ganho de Torque com Etanol | Perda de Autonomia com Etanol | Partida a frio com Gasolina |
|---------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1ª | 2003 | 10,1 a 10,8 | 2,1% | 2,1% | 25% a 35% | sim |
| 2ª | 2006 | 10,8 a 13,0 | 4,4% | 3,2% | 25% a 35% | sim |
| 3ª | 2008 | 11,0 a 13,0 | 5,6% | 9,3% | 25% a 30% | sim |
| 4ª | 2009 | 11,0 a 13,0 | 5,6% | 9,3% | 25% a 30% | não |

2.4. TRABALHOS EXPERIMENTAIS

De acordo com MACLEAN *et al.* (2003), o etanol possui alta octanagem e maiores faixa de inflamabilidade, velocidade de chama e entalpia de vaporização quando comparado às gasolinas convencionais. Estas características permitem maiores taxas de compressão, menores tempos para a combustão e um processo de queima mais eficiente do que para as gasolinas convencionais. As desvantagens deste combustível são o menor poder calorífico, alta corrosividade,

miscibilidade com a água e baixa pressão de vapor, o que dificulta a partida a frio dos motores.

DAL BEM *et al* (2006), concluem que ao adicionar mais água ao etanol hidratado, transformando-o de 92,8°INPM (percentual de etanol em massa) para 75°INPM e testá-lo em um motor movido a etanol com taxa de compressão de 13,5:1, ocorreu aumento do torque máximo, potência máxima e consumo de combustível, bem como redução da eficiência de conversão de combustível (rendimento térmico). Quanto às emissões, foram observados redução de óxidos de nitrogênio (NOx) e aumento de hidrocarbonetos (THC). Ainda de acordo com os autores, uma maior hidratação do etanol permite projeto de motores com maiores taxas de compressão.

MASSA (1992) utilizou um motor monocilíndrico ASTM CFR Waukesha com taxa de compressão variável, próprio para a determinação de octanagem de gasolinas, tendo por objetivo obter curvas de pressão no cilindro, calor liberado e fração de massa queimada para diversos combustíveis utilizados em motores do ciclo Otto. Para tanto, foi necessário instrumentar o motor, tornando possível a obtenção dos dados necessários ao cálculo de parâmetros de combustão pretendidos. Os combustíveis utilizados foram: gasolina pura, misturas de gasolina e etanol anidro em 4%, 15% e 30% em volume, além do próprio etanol anidro. Para este último foram observados os valores mais altos de potência, considerando uma taxa de compressão de 5,98:1, bem como os maiores valores de consumo específico de combustível. Também foi observado, pelo gráfico de fração de massa queimada, que o etanol anidro apresentou a menor velocidade de combustão em relação às gasolinas.

ANDRADE (2007) verificou a variação da duração da combustão do etanol, pesquisando a influência da taxa de compressão e da relação ar – combustível da mistura nesses resultados. Para tanto, também utilizou um motor monocilíndrico com taxa de compressão variável, utilizado para a determinação de octanagem de combustíveis (ASTM CFR).

VILANOVA (2007) verificou que o uso de etanol hidratado em motor flexível apresentou grandes desvantagens em termos de consumo quando comparado à gasolina C, sem que tenha havido qualquer aumento de trabalho produzido, concluindo que o desempenho deste estava otimizado para o uso de gasolina C.

Segundo JOSEPH JR (2009), a primeira geração dos carros flexíveis, surgida em 2003 no Brasil, funcionava com motores com taxas de compressão entre 10,1 e 10,8, que tinham sua potência e torque aumentados em 2,1% com o etanol, porém seu rendimento térmico diminuído de 25% a 35%, em comparação com a gasolina. O sistema de injeção de partida a frio com gasolina foi utilizado nas três primeiras gerações (2003-2008). Já em 2009, com a quarta geração, foi desenvolvido, um sistema de pré-aquecimento do combustível, deixando de ser necessária a utilização somente da gasolina para dar a partida no motor a temperaturas baixas. O pré-aquecimento é controlado pela ECU e uma exclusiva unidade de controle de aquecimento (HCU). O sistema, portanto, analisa as condições do combustível no momento da partida, determinando se é necessário ou não o seu pré-aquecimento.

OLIVERIO *et al.* (2009) relatam que, com o início da tecnologia flexível, diversos sensores de etanol têm sido desenvolvidos para detectar a concentração desse combustível alternativo nas misturas com gasolina. Porém, tais dispositivos (instalados no tanque ou na linha de combustível) não são amplamente utilizados na produção veicular, devido principalmente ao seu alto custo.

O conteúdo do etanol no combustível também pode ser detectado indiretamente por meio do sensor de oxigênio, também conhecido como sonda lambda (sinal de correção da mistura ar/combustível, que trabalha em circuito fechado com a unidade de controle eletrônico). Embora a determinação do etanol através do sensor lambda possa atingir uma aceitável exatidão, sua velocidade de detecção é lenta e, portanto, não pode ser usado na partida do motor (ROTRAMEL *et al.*, 1999). Além disso, este método pode acarretar outras falhas, tais como os desvios no sensor da vazão mássica de ar ou no injetor de combustível, causado por uma alteração na concentração de etanol (THEUNISSEN, 2003).

Outros métodos modernos baseiam-se na leitura de sensores de pressão do cilindro, explorando os efeitos da concentração do etanol no comportamento da combustão. No entanto, essas técnicas coincidem, em certa forma, com o método da sonda lambda, porque ambas dependem da combustão para relacionar as propriedades do combustível. Uma aplicação dessa metodologia foi proposta por OLIVERIO *et al.* (2009) para determinar o teor de etanol em motores flexíveis de injeção direta. No entanto, sua técnica se fundamentaria nos efeitos do resfriamento da carga sobre a curva da pressão no cilindro.

MELO (2007) realizou estudos experimentais de um motor flexível, 1,8 litros, 4 cilindros, 8 válvulas, taxa de compressão de 11:1, máxima rotação de 5.250 rpm, operando com dois combustíveis comerciais no Brasil: a gasolina comum (com 23% de etanol anidro) e o etanol hidratado (com 7% de água destilada). Os ensaios foram realizados em dois níveis de carga (50 e 75 Nm) e cinco rotações do motor (1.500, 2.000, 2.500, 3.000 e 3.500 rpm). Assim, em cada ponto de operação (torque x rotação), a potência do motor foi mantida constante quando utilizados cada um dos combustíveis. Porém, as curvas da pressão no interior do cilindro apresentaram valores máximos quando o motor funcionou com o etanol hidratado. Tal efeito foi explicado, em parte, pela diferença dos ângulos de avanço da ignição, que ficaram entre 5° e 7° menores com a gasolina na condição de carga mais elevada (75 N.m).

COSTA e SODRÉ (2009) estudaram o desempenho e as emissões de um motor flexível, 1,0 litro, 4 cilindros, 8 válvulas, taxa de compressão de 12:1, funcionando com etanol hidratado (6,8% de água no etanol) e mistura combustível gasolina-etanol (22% de etanol anidro). O desempenho do motor nas condições de plena carga foi otimizado através do avanço da ignição. Os resultados dessa otimização reportaram que, em toda a faixa de rotação avaliada (1.100 a 6.500 rpm), os ângulos do avanço da ignição para o etanol hidratado (entre 20° e 32° antes do PMS) foram maiores do que os da mistura gasolina-etanol (entre 16° e 26°).

Em baixas rotações, inferiores a 4.000 rpm, os valores de torque foram maiores quando o motor consumiu a mistura gasolina-etanol. Porém, nas altas rotações, entre 4.000 e 6.500 rpm, o uso de etanol hidratado produziu uma maior potência no eixo do motor. A relação dos consumos específicos de ambos os combustíveis (incluindo unidades de volume, em lugar de massa) sugeriu que o uso de etanol hidratado somente será rentável quando o preço máximo ao consumidor for igual a 72% do preço da mistura gasolina-etanol.

No que tange às emissões, CO e HC foram reduzidas com o etanol hidratado, mas os níveis de CO₂ e NO_x foram aumentados quando comparados ao funcionamento com a mistura gasolina-etanol. A maior concentração dos óxidos de nitrogênio nos gases de escape do motor foi atribuída ao maior avanço da ignição na operação com etanol hidratado.

BREWSTER (2007a) em seu estudo do desenvolvimento de sistema de combustão de injeção direta avaliou as vantagens e desvantagens do uso de etanol anidro (E100) como combustível, ao invés de apenas adicionado na gasolina. Os testes foram realizados em um motor 4 cilindros, turbo-alimentado, de 2,0 litros, com taxa de compressão 10,4:1, funcionando em rotações desde 1.250 até 5.500 rpm. Comparado a um motor típico à gasolina (98 RON), o etanol apresentou para maiores avanços de ignição, menores pressões e vazões de ar requeridas, temperaturas de gases de exaustão consideravelmente mais baixas, ausência de combustão detonante e menores emissões de CO₂. Claramente o consumo de etanol foi maior por apresentar menor poder calorífico. Quanto ao torque máximo, os dois combustíveis obtiveram valores semelhantes, apesar de o etanol fornecer torques maiores que o da gasolina em uma faixa de valores entre 1.250 e 1.500 rpm. No quesito partida a frio à temperatura ambiente (25 °C) não existiu nenhuma diferença entre o etanol anidro e a gasolina. Para o autor, o desenvolvimento de motores de injeção direta de etanol apresenta, além de tudo, um grande potencial de redução do tamanho de motores (“*downsizing*”) funcionando no modo bi-combustível.

Em outro trabalho, BREWSTER (2007b) investigou os efeitos da água contida nos combustíveis sobre o processo de combustão e as emissões de um motor Otto utilizado em sua pesquisa anterior. Durante os testes, foram comparados o etanol anidro (E100) e três misturas hidratadas (E93, E87, E80). Parte dos testes foram realizados em aproximadamente 50% da plena carga, numa rotação de 2.000 rpm, pressão de 100 kPa no coletor de admissão e avanço de ignição fixo, mostrando que houve um aumento do atraso da ignição (período definido desde a liberação da faísca até 10% da fração da massa queimada) junto ao aumento do teor de água. Nessas mesmas condições, a potência, o rendimento e a estabilidade da combustão diminuíram, enquanto o ângulo mínimo da ignição para o melhor torque (AMT) foi avançado. As emissões de CO não foram afetadas pela presença da água. As emissões de NOx diminuíram linearmente com o aumento do teor de água no combustível, enquanto as emissões de HC aumentaram nas misturas E93 e E87. A temperatura dos gases de escape também diminuiu ligeiramente com o teor de água. No AMT, o aumento do teor de água pode causar uma redução por volta de 10 °C.

BRUNOCILLA (2006) estudaram a influência da injeção aquecida de etanol hidratado (com 7% de água) num motor flexível, 4 cilindros em linha, 1,6 litros. Nesse trabalho, eles mostraram os benefícios desta tecnologia sobre dois aspectos principais: o primeiro trata-se do desenvolvimento de um sistema assistente de partida a frio que usa o próprio etanol, eliminando a necessidade de um tanque de gasolina; o segundo diz respeito aos efeitos do aquecimento do combustível sobre o enquadramento do veículo no padrão de emissões brasileiro chamado PROCONVE fase L-5, principalmente no que tange às emissões de hidrocarbonetos não queimados. Há diversos fatores que influenciam na fase inicial de partida do motor, dentre eles: poder calorífico, razão ar/combustível (8,5:1 para o etanol e 13,3:1 para a gasolina), calor latente de vaporização, ponto de fulgor (12 °C para o etanol). Os pesquisadores afirmam que o novo sistema de partida é aplicável somente quando o veículo estiver usando etanol hidratado com pureza maior a 70 %. Uma vantagem desse sistema de combustível aquecido é a possibilidade da redução do volume de etanol injetado, reduzindo também a quantidade de combustível não queimado e a contaminação do óleo do motor. O motor teve seu funcionamento otimizado para operar com essa nova tecnologia, obtendo melhores resultados do que os sistemas convencionais (partida a gasolina), reduzindo significativamente as emissões de HC (aprox. 21,5%) e CO (aprox. 28,5%).