



UMA BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS EFEITOS DO ETANOL NA GASOLINA AUTOMOTIVA

Hayê Miranda Amorim¹, Samara Cristina dos Santos Almeida², Artur da Silva Oliveira²

¹Universidade Federal do Pará, Belém, Pará (haye.amorim@icen.ufpa.br)

²Universidade Federal do Pará, Belém, Pará

Resumo: Esta pesquisa traz embasamento apontando a partir da literatura que a pressão de vapor e a entalpia de vaporização são grandezas termodinâmicas fundamentais na formulação de combustíveis, influenciando seu desempenho. A adição de etanol à gasolina modifica essas propriedades devido a interações intermoleculares de forma única e diferente das características singulares da gasolina e do etanol individuais, mostrando que há valores ideais dessas características e vantagens em certas misturas.

Palavras-chave: Etanol; Gasolina; Combustível.

INTRODUÇÃO

Quando um líquido é colocado em um recipiente fechado sob vácuo, suas moléculas passam da fase líquida para a gasosa até atingir um equilíbrio dinâmico, no qual moléculas migram continuamente entre as fases líquida e vapor. O aumento da temperatura fornece energia térmica suficiente para superar as forças intermoleculares, promovendo a transição de mais moléculas para a fase gasosa e, consequentemente, elevando a pressão de vapor. (Atkins, 2018)

A pressão exercida pelo vapor nesse equilíbrio denomina-se pressão de vapor e depende da temperatura, sendo a quantidade de calor necessária para evaporar um líquido a entalpia de vaporização. Ambas grandezas estão relacionadas e influenciam-se pelas interações das moléculas umas às outras. (Kar *et al*, 2009)

Deve-se ressaltar que a pressão de vapor e entalpia de vaporização de combustíveis devem estar em um intervalo pré-determinado para o funcionamento adequado de motores de combustão, sendo o seu desequilíbrio causa para ineficiência, descontrole da razão ar/combustível, falhas na ignição e emissão de poluentes orgânicos. (Cataluña, 2006)

Sendo o Brasil pioneiro na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar sustentável, prevê-se um aumento gradual no uso de etanol como combustível em âmbito nacional, sendo hoje o teor estipulado por lei da adição do álcool de 27% na gasolina comercial. (Brasil, 2024)

Todavia, somente com misturas binárias de etanol/gasolina é possível atingir as propriedades físico-químicas desejadas para o funcionamento adequado de motores de combustão interna atuais. A

gasolina composta com etanol apresenta características únicas, distintas das de seus componentes puros, devido às interações intermoleculares (Cataluña, 2006)

Este artigo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os efeitos do etanol em combustíveis automotivos, abrangendo desde alterações em parâmetros físico-químicos internos do combustível até implicações socioambientais e econômicas. Para tanto, são abordados conceitos fundamentais como pressão de vapor, entalpia de vaporização e equilíbrio de fases, além da análise das interações entre essas grandezas. Discutem-se também as propriedades físico-químicas desejáveis da gasolina, o impacto da pressão de vapor no potencial químico, e as modificações provocadas pelo etanol na pressão de vapor e na entalpia de vaporização da gasolina. Por fim, são examinados os efeitos adversos e benéficos do uso de etanol em sistemas automotivos, energéticos e ambientais, bem como suas influências na performance veicular e na mitigação de danos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada no trabalho para desenvolvimento desse artigo foi baseada na pesquisa por meio de revisão bibliográfica qualitativa descritiva, analisando a relevância do tema sob a perspectiva de alguns autores, buscando dados referentes a temática de pressão de vapor, entalpia de vaporização de combustíveis, composição molar, efeito do etanol na pressão de vapor na gasolina entre efeitos socioeconômicos e ambientais. Por meio deste tipo de pesquisa, selecionou-se material com base no levantamento realizado, composto por 21 artigos online nas plataformas Google acadêmico, Scientific Electronic Library Online, (SCIELO) e Revistas

Eletrônicas. A figura 1 se dispõe a amostragem ao decorrer dos anos dos artigos compostos no levantamento:

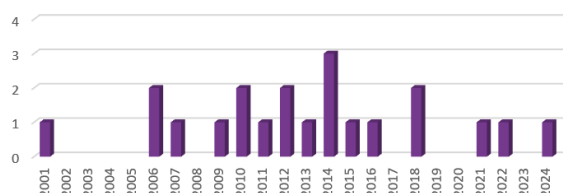


Figura 1: Gráfico de distribuição de artigos ao decorrer dos anos

Fonte: Elaborado pelo autor

Enquanto na figura 2 se dispõe geograficamente a nacionalidade dos artigos selecionados:

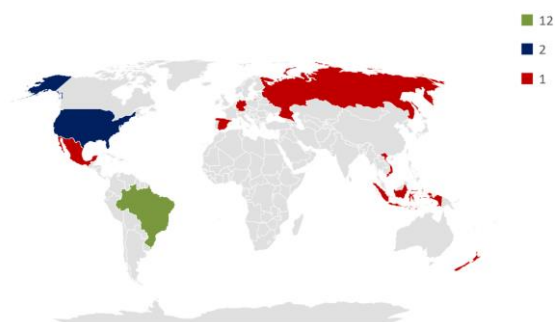


Figura 2: Mapa da distribuição da nacionalidade dos artigos

Fonte: Elaborado pelo autor

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise dos resultados é importante destacar alguns conceitos importantes que refletem diretamente nas análises deste trabalho:

O potencial químico (μ) de uma substância é a medida da energia livre associada a cada unidade de quantidade de matéria em um sistema. Ele é formalmente definido como a derivada da energia livre de Gibbs (G) em relação ao número de mols (n) da substância, mantendo temperatura (T) e pressão (P) constantes (Atkins; de Paula, 2014):

$$\mu = \frac{\delta G}{\delta n} \quad (1)$$

O potencial químico representa a tendência de uma substância sofrer transformações químicas ou físicas. Se duas fases de uma substância coexistem, o potencial químico deve ser igual em ambas para que o

sistema esteja em equilíbrio. Caso contrário, ocorrerá transferência de massa entre as fases até que essa igualdade seja alcançada (Callen, 1985)

Para um gás ideal, o potencial químico pode ser expresso como:

$$\mu = \mu^0 + RT \ln \frac{P}{P^0} \quad (2)$$

onde: μ^0 é o potencial químico de referência a uma pressão padrão P^0 ; R é a constante dos gases, T é a temperatura absoluta, P é a pressão parcial da substância na fase gasosa.

A pressão de vapor de uma substância é a pressão exercida pelo seu vapor quando está em equilíbrio dinâmico com sua fase condensada (líquida ou sólida) em um sistema fechado. Esse equilíbrio ocorre porque a taxa de evaporação das moléculas da fase condensada se iguala à taxa de condensação do vapor (Atkins e de Paula, 2014).

A relação entre a pressão de vapor e a temperatura é descrita pela equação de Clausius-Clapeyron, que modela a variação da pressão de vapor com a temperatura:

$$\frac{d \ln P_v}{dT} = \frac{\Delta H_{vap}}{RT^2} \quad (3)$$

onde:

ΔH_{vap} é a entalpia de vaporização, R é a constante dos gases, T é a temperatura absoluta.

A integração dessa equação resulta na forma mais conhecida:

$$\ln P_v = \frac{\Delta H_{vap}}{RT} + C \quad (4)$$

Essa equação indica que a pressão de vapor aumenta exponencialmente com a temperatura. A pressão de vapor influencia fenômenos como: Ponto de ebulição, que ocorre quando a pressão de vapor do líquido se iguala à pressão externa; Evaporação: quanto maior a pressão de vapor, mais volátil é a substância; Sublimação: sólidos com alta pressão de vapor, como o gelo seco ($\text{CO}_2(\text{s})$), sublimam diretamente para a fase gasosa; O equilíbrio de fases ocorre quando duas ou mais fases de uma substância coexistem sem variação macroscópica ao longo do tempo. Isso significa que a taxa de transferência de moléculas entre as fases é igual nos dois sentidos. A condição fundamental para o equilíbrio de fases é que o potencial químico seja o mesmo em todas as fases presentes (Callen, 1985):



$$\mu_{liq} = \mu_{vap} \quad (5)$$

Se essa igualdade não for satisfeita, a substância migrará espontaneamente da fase de maior potencial químico para a fase de menor potencial químico até que o equilíbrio seja restabelecido. O diagrama de fases de uma substância ilustra os estados de equilíbrio entre sólido, líquido e vapor em função da pressão e temperatura. Os principais pontos desse diagrama são: Ponto triplo: onde as três fases coexistem em equilíbrio. Ponto crítico: temperatura e pressão acima das quais não há distinção entre líquido e vapor sendo a pressão de vapor de um líquido o critério de temperatura na qual ele ferve.

Quando a pressão de vapor se iguala à pressão externa, a substância entra em ebulição, permitindo uma transição estável entre líquido e vapor. Para que duas fases coexistam, seus potenciais químicos devem ser iguais. Caso contrário, haverá transferência de massa até que o equilíbrio seja atingido. Essa igualdade explica, por exemplo, porque a água pode existir como líquido e vapor em determinadas condições de temperatura e pressão.

O potencial químico de uma substância na fase gasosa depende diretamente de sua pressão de vapor, como mostrado pela equação (1). Esse comportamento é essencial para entender fenômenos como umidade relativa do ar e condensação em atmosferas fechadas.

A pressão de vapor na gasolina é um parâmetro primordial para caracterizá-la e seu o método clássico de cálculo se baseia em torno da energia livre de Gibbs. Entretanto, ao se constatar que a gasolina é uma matriz de dezenas de hidrocarbonetos desconhecidos, métodos de termodinâmica de misturas contínuas se mostram mais eficazes e menos custoso de tempo. Ao fim, é capaz de fornecer boas estimativas para a pressão de vapor dentro da faixa de 20°C a 60°C de temperatura conhecendo-se apenas a curva de destilação das amostras de gasolina (2º Congresso nacional em P&D em petróleo e gás natural, 2003)

Misturas binárias de gasolina com 5 a 15% de álcool reduzem significativamente a temperatura de destilação em comparação à gasolina pura (que é diretamente relacionado com a entalpia de vaporização). Porém, misturas ternárias de metanol/etanol/gasolina conseguem atingir características mais adequadas ainda, com maiores índice de octanagem do que misturas binárias com etanol. Sendo então mais econômica e reduzindo o impacto do metanol na pressão de vapor (Amine; Barakat, 2019)

A pressão de vapor (P_v) de uma substância é definida como a pressão exercida pelo vapor dessa substância

sonora quando está em equilíbrio com sua fase condensada (líquida ou sólida) em um sistema fechado (Atkins; de Paula, 2014). Em outras palavras, é a pressão na qual a taxa de evaporação se iguala à taxa de condensação. Esse equilíbrio ocorre porque as moléculas da fase líquida ou sólida podem escapar para a fase gasosa e vice-versa (Callen, 1985).

A pressão do vapor depende diretamente da temperatura e da natureza da substância. Quanto maior a temperatura, maior a energia cinética média das moléculas e, consequentemente, maior a pressão de vapor. A relação entre temperatura e pressão de vapor pode ser descrita pela proposta de Clausius-Clapeyron, que expressa a variação da pressão de vapor com a temperatura (Silbey *et al.*, 2001).

O potencial químico (μ/μ_{μ}) é uma grandeza termodinâmica que representa a variação da energia livre de Gibbs (G) de um sistema quando há uma mudança na quantidade de uma substância. Em equilíbrio de fases, o potencial químico da substância deve ser o mesmo em todas as fases, garantindo a estabilidade do sistema (Atkins; de Paula, 2014).

A entalpia de vaporização do sistema etanol-gasolina na literatura estabelecida identifica valores constantes da entalpia molar parcial de vaporização. Esses dados podem ajudar a regular a volatilidade dos combustíveis com álcool, tornando-os mais competitivos que a gasolina convencional. Também é revelado a estrutura dispersa da mistura etanol-gasolina, destacando que o raio das partículas dispersas varia conforme a concentração de etanol, situando-se na faixa de centenas de nanômetros. Essas informações são fundamentais para evitar a separação de fases, geralmente causada pela coalescência de gotículas de álcool-água. Modificar a estrutura coloidal do sistema pode ser uma solução eficaz para aprimorar a qualidade do combustível. (Balabin *et al.*, 2006)

Além das metodologias estabelecidas que determinam a pressão de vapor e entalpia de vaporização de combustíveis, com valores precisos com os tabelados para gasolinas formuladas com etanol, sendo uma ferramenta útil para se medir essas propriedades. Ensaio de cromatografia gasosa com detector de ionização de chama indicam que gasolinas com maior pressão de vapor provavelmente se dão pela maior concentração de hidrocarbonetos de quatro a seis átomos de carbono. O aumento mais significativo de entalpia de vaporização ocorre com gasolinas com alto teor de aromáticos, diminuindo conforme sua concentração reduz. Acima de 5% de etanol em volume, a entalpia de vaporização se estabiliza, comportamento semelhante ao da pressão de vapor (Cataluña; Silva, 2006)



Os efeitos relatados também mostram aumento da pressão de vapor até 10–20% de etanol, seguido de queda para níveis do etanol puro na compressão, com redução térmica de 1–10 K. Embora o potencial de resfriamento por evaporação aumente com o teor de etanol, ele é limitado pela completude da evaporação, que depende da pressão de vapor do combustível. O resfriamento por evaporação cresce com o teor de etanol, mas é limitado pela pressão de vapor. Até E30, a volatilidade é alta, mas o resfriamento é menor; acima de 50%, a baixa volatilidade favorece maior absorção de energia. O resfriamento máximo ocorre entre E30 e E50, com azeótropos variando de 10% a 30°C para 20% a 60°C. A entalpia de vaporização cresce linearmente até 20%, estabiliza entre E30–E60 e volta a subir acima de 60%. (Kar *et al*, 2009)

Estudos com DFT (Teoria funcional de densidade) observaram que a adição de etanol à gasolina reduz a capacidade calorífica (CP) e a entropia (S) da gasolina em todas a faixa de temperatura estudadas, afetando sua volatilidade. No entanto, a 40 K, os combustíveis apresentam valores semelhantes dessas propriedades. Além disso, a entalpia apresentou valores coerentes antes e após a combustão. Verificou-se que a adição de etanol reduz a fração de energia química liberada na combustão, variando de 75,86% (E100) a 78,35% (gasolina padrão e comum). Isso confirma o potencial antidetonante do etanol e a variação de energia entre temperatura ambiente e temperatura de ignição. (Neto *et al.*, 2015)

Aprofundando-se na relação entre a energia de ativação e a energia útil das misturas gasolina-etanol, utilizando métodos de análise térmica, como termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA), estudos demonstram que misturas com baixos teores de etanol (até 30%) exibiram sinergismo positivo, melhorando o desempenho em motores de ciclo Otto, principalmente nas taxas de compressão entre 6:1 e 7:1. Tais misturas apresentaram maior volatilidade, favorecendo a combustão. Ademais, os dados indicaram que o teor de etanol influencia diretamente a estabilidade térmica e as características de ignição das misturas, sendo as proporções de 5% a 30% as mais eficientes em termos de potência e consumo específico (Quiroga, 2016).

Nesse sentido, avaliando o impacto da adição de etanol hidratado na gasolina automotiva Tipo C em motores bicomcombustíveis, revelou que, embora o etanol proporcione ganhos em torque em condições específicas, como razão estequiometria de 0,9 e avanço de ignição de 20° antes do ponto morto superior, o consumo de combustível aumentou significativamente, com acréscimos de até 50% em relação ao uso exclusivo de gasolina. Adicionalmente, as emissões de poluentes como monóxido de carbono

(CO) e hidrocarbonetos (HC) foram mais sensíveis às configurações operacionais do motor do que à formulação do combustível. Esses resultados destacam tanto os benefícios quanto os desafios associados à utilização de misturas gasolina-etanol, especialmente em relação à eficiência energética e às emissões. (Vilanova, 2007).

Abordando um aspecto fundamental para a caracterização de combustíveis: a determinação da entalpia de vaporização, e, a partir disso, utilizando a metodologia do isoteniscópio, permiti-se avaliar como a pressão de vapor varia com a temperatura, uma propriedade essencial para prever o comportamento de misturas combustível-álcool em diferentes condições. O etanol, presente na mistura, exibe forte interação intermolecular devido às ligações de hidrogênio, o que se reflete em uma entalpia de vaporização mais elevada. Já os componentes da gasolina, majoritariamente hidrocarbonetos apolares, apresentam menores valores de entalpia de vaporização. A análise do comportamento de uma mistura como essa exigiria a consideração da composição e das possíveis interações entre os constituintes, mas o método proposto no trabalho pode ser adaptado para esse fim, possibilitando a construção de curvas $\ln(P)$ versus $1/T$ e a aplicação da equação de Clausius-Clapeyron. (Gerola *et al*, 2010).

Analisando o impacto de misturas etanol-gasolina (E5, E10 e E20) no desempenho e nas emissões de um motor de motocicletas, observou-se que a adição de etanol melhora a eficiência da combustão devido ao seu maior teor de oxigênio, resultando em melhor queima e aumento de potência, especialmente com E10. As emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) foram significativamente reduzidas, com o E20 apresentando quedas de 61% e 35%, respectivamente, em comparação com a gasolina pura. No entanto, as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) aumentaram com o teor de etanol, alcançando até 67% a mais com E20, devido ao aumento da temperatura de combustão. O consumo de combustível também cresceu levemente, sobretudo com E20 em baixas velocidades, devido ao menor poder calorífico do etanol. Ainda assim, destaca-se que misturas moderadas. (Xuan *et al*, 2022).

A contração volumétrica das misturas de etanol-gasolina é tão pequena (menos de 0,25%) que pode ser considerada insignificante. Portanto, as densidades das misturas podem ser calculadas como a média ponderada pela composição volumétrica da mistura. A adição de etanol à gasolina aumenta a pressão de vapor de Reid (RVP) da mistura apenas até E30–E35. Misturas mais ricas em etanol apresentam menor RVP do que a gasolina base. O aumento máximo da RVP é de aproximadamente 5–6 kPa na faixa de misturas E4–



E10. Há a formação de azeótropos entre o etanol e a gasolina que alteram significativamente a curva de destilação: frações mais leves das misturas de etanol são mais voláteis (até E40–E50) e as frações médias e pesadas são menos voláteis do que a gasolina base. (Antón, 2013)

Os testes realizados confirmaram que o etanol é um bom potenciador do octanagem. Nas amostras estudadas, o Número de Octano aumentou até 6,5% com a adição de 15% de etanol em volume à gasolina comum. Da mesma forma, a pressão de vapor aumentou em mais de 50% ao adicionar 10% de etanol à gasolina Premium. Isso implicaria um aumento nas emissões evaporativas, a menos que controles adequados sejam aplicados aos sistemas de fornecimento de combustível nos veículos. A T50 diminuiu cerca de 20%, o que poderia causar problemas relacionados à formação de bloqueios de vapor. O rendimento médio do combustível, expresso em km/L com base nos dados de poder calorífico, diminuiria até 8,1% na gasolina comum oxigenada com 15% de etanol. Quanto às emissões teóricas de CO₂, a reformulação da gasolina comum com 10% de etanol reduziria em 7,2% e com 15% de etanol apresentaria uma diminuição de 7,5%, em comparação com a gasolina sem etanol. O acima exposto não leva em consideração o CO₂ liberado pela combustão do etanol. Em relação às misturas diesel-etanol, o Número de Cetano das misturas diminuiu até 13,0% e seu poder calorífico diminuiu em 2,3 MJ/kg quando oxigenado com 15% de etanol. Quanto às emissões teóricas de CO₂, com 10% de etanol, elas diminuiram 5,3% e com 15% de etanol a redução foi de 9,2%. (Castillo *et al*, 2012)

Compostos aromático são uma alternativa para aumentar a octanagem da gasolina, entretanto, são tóxicos e suas concentrações limitadas em diversos países. O etanol se encontra como uma alternativa renovável e capaz de melhorar as emissões de poluentes como CO₂, CO, HC e NO_x. Análises econômicas provam que o uso de gasolina com etanol resultam em redução de mais de 23% no preço de cada kW produzido. Além das capacidades refrigerantes do etanol contribuírem com a redução da temperatura nos cilindros, que reduzem até 32% da emissão de No_x. (Amaral, 2021)

A corrosão proveniente do etanol é mais provável em virtude da polaridade do álcool que pode solvatar sais e levá-los aos componentes do motor e do tanque. A taxa de corrosão estimada de um tanque de combustível feito de Fe_U_100, obtida por regressão exponencial para o uso de etanol puro, é de 4,116 mpy. Nos critérios relativos de resistência à corrosão, essa taxa é classificada como "excelente". Mesmo a adição artificial de cloreto de sódio não foi capaz de acelerar

excessivamente a corrosão do tanque. (Setiyo *et al*, 2018)

Sobre a corrosão de alumínio (que é encontrado principalmente no bloco do motor e cabeçote), a corrosão seca depende principalmente da temperatura e do teor de água, enquanto o teor de etanol e o tamanho de grão do alumínio são fatores secundários. Para ocorrer corrosão seca, o teor de água deve ficar abaixo de um limite crítico — cerca de 0,2% em volume na mistura etanol-combustível. Não se sabe se esse valor varia com a temperatura. Testes de imersão mostraram que temperaturas próximas ao ponto de ebulição do etanol causam forte corrosão, e mesmo a 60 °C, após 336 h, houve ataque, embora com menor intensidade. A variação no teor de etanol também influencia: quanto maior a concentração, menor o tempo até início da corrosão e maior o número de pontos de ataque. Em todos os casos, a corrosão foi severa o suficiente para causar falha do componente. Testes eletroquímicos e de imersão com ligas alumínio-cobre sugerem que a corrosão seca segue um mecanismo químico predominante. Baseando-se nesses resultados e observações, propõe-se uma teoria de corrosão em duas fases para misturas gasolina-etanol. Revestimentos de níquel quimicamente depositado mostraram excelente resistência aos combustíveis alcoólicos, independentemente da temperatura ou do teor de água e etanol, com perda de massa mínima e sem formação de produtos de corrosão. (Krüger *et al*, 2011)

Estudos sobre a corrosão do aço carbono em etanol grau combustível simulado (SFGE) demonstram que suas propriedades eletroquímicas de superfície são altamente sensíveis à composição da mistura. Em particular, a concentração de água influencia significativamente tanto a corrosão generalizada quanto a formação de pites: abaixo de 5% em volume, a suscetibilidade à corrosão localizada aumenta, enquanto concentrações superiores a 10% tendem a reduzi-la. A presença de 2,5% de água gera um equilíbrio instável entre passivação e sua ruptura, não sendo observados potenciais de passivação ou de ruptura bem definidos. A redução da acidez da solução mostrou efeito inibidor para ambos os tipos de corrosão, sendo as condições alcalinas as mais protetivas. A adição de cloretos agrava o ataque corrosivo, promovendo desestabilização do filme passivo e queda nos potenciais de corrosão ($E_{\text{corrosão}}$) e repassivação ($E_{\text{repassivação}}$). Já a desaeração da solução reduz, mas não elimina, a formação de pites, também com decréscimo dos valores de $E_{\text{corrosão}}$ e $E_{\text{repassivação}}$. Quanto aos produtos de corrosão, predomina a formação de óxidos de ferro em baixos teores de água, e hidróxidos de ferro à medida que a umidade aumenta. (Lou e Singh, 2010)



Considerando etanol hidratado combustível em veículos leves, as emissões de acetaldeído foi 85% maior e a de formaldeído 66% maior em veículos em comparação à gasool A22, com a maior emissão de aldeídos ocorrendo na fase transitória fria e de etanol na partida a frio. As emissões de metano foram cerca de 60% maiores com etanol hidratado combustível, relevantes para o impacto climático. Cerca de 33 % dos ensaios de veículos flex com etanol hidratado combustível possuem emissões de etanol escape relevantes para a formação de ozônio troposférico, sendo considerado problemático. (Sousa *et al*, 2014)

Ainda no quesito de poluentes, através de cromatografia gasosa a reatividade específica do potencial de formação de ozônio atmosférico das emissões de hidrocarbonetos não metano (NMHC), de um veículo Polo BlueMotion 1.6 L Eflex emitidas pelo gás de escapamento, quando o veículo é abastecido com 100% de etanol hidratado(E100) é 32% inferior a reatividade específica das emissões de NMHC no mesmo veículo, quando abastecido com gasolina C22 (E22). (Graner *et al*, 2014)

Analisando a relação de path dependence (refere-se à ideia de que decisões passadas ou eventos anteriores podem influenciar significativamente decisões e eventos futuros, mesmo que as condições tenham mudado) no sistema econômico e institucional do álcool combustível no Brasil, confirmando que a “orquestração” de interesses, as trajetórias tecnológicas e as mudanças institucionais consolidaram o etanol como substituto relevante do petróleo. Embora o etanol tenha se fortalecido e representasse 16% da matriz energética em 2011, seu futuro depende do desenvolvimento de novas tecnologias e do aproveitamento de subprodutos para enfrentar concorrentes como o carro elétrico. Destaca-se que o etanol, apesar de sua importância atual, não é a única alternativa viável para substituir derivados de petróleo. Assim, são necessárias políticas públicas que reforcem a P&D, infraestrutura e gestão, enquanto o etanol de segunda geração é visto como uma solução promissora, mas ainda incipiente (e não única). (Shikida e Perosa, 2012)

Utilizando-se do modelo SVAR (Vetores autorregressivos Estruturais) para analisar as variáveis endógenas e suas interações. Os resultados mostram que um aumento na demanda de etanol, impulsionado pelos veículos flex, não gerou grandes impactos nos mercados de etanol e gasolina. A demanda por etanol aumentou com o preço da gasolina, sendo o efeito de complementaridade maior do que o de substituição. No longo prazo, a substituição do etanol pela gasolina

se intensifica. O aumento no preço do etanol não impactou significativamente a demanda de etanol anidro, mas reduziu a de etanol hidratado. O estudo também abordou o impacto da crise no setor sucroalcooleiro, que levou à falta de investimentos e ao aumento do preço do etanol, forçando os consumidores a optarem por gasolina com etanol. Para garantir o sucesso do etanol como substituto da gasolina, são necessários incentivos como regras claras, redução de impostos e financiamento para ampliar a capacidade produtiva. O modelo também sugere que a não intervenção governamental nos preços da gasolina pode ser prejudicial ao setor, dada a volatilidade dos preços do barril de petróleo. Além disso, a análise do mercado de açúcar, produto derivado da mesma matéria-prima do etanol, também é essencial para entender a dinâmica do setor sucroalcooleiro e seu impacto no mercado de gasolina. (Melo e Sampaio, 2014)

CONCLUSÃO

Através das pesquisas realizadas constatou-se que o etanol, ao ser adicionado à gasolina, promove alterações significativas nas propriedades físico-químicas do combustível, influenciando diretamente no desempenho energético, na queima e na emissão de poluentes e esses efeitos dependem da proporção utilizada, da composição da gasolina e das condições de operação dos motores, tornando-se uma alternativa eficiente e sustentável para motores modernos. Além dos benefícios termoquímicos, a substituição parcial da gasolina pelo etanol demonstra vantagens ambientais e econômicas, reduzindo a emissão de poluentes gasosos, bem como estratégia para diversificar a matriz energética. Assim, considerando as vantagens em detrimento dos malefícios, misturas binárias de etanol/gasolina se mostram as mais vantajosas se compostas majoritariamente de gasolina, oferecendo uma solução equilibrada entre eficiência energética e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

AMARAL, L. V.; SANTOS, N. D. S. A.; ROSO, V. R.; SEBASTIÃO, R. de C. de O.; PUJATTI, F. J. P. Effects of gasoline composition on engine performance, exhaust gases and operational costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, 110196, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110196>

ANTÓN, Luis Miguel Rodríguez. Experimental determination of some physical properties of gasoline,



ethanol and ETBE blends. *Fuel*, ed. 112, p. 178-184, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.087>

ATKINS, Peter; DE PAULA, Julio. *Físico-Química*. (Peter Atkins, Julio De Paula). LTC, Rio de Janeiro, 2018.

BALABIN, Roman M. et al. Molar enthalpy of vaporization of ethanol–gasoline mixtures and their colloid state. *Fuel*, Gubkin, v. 1, n. 1, p. 323-327, 8 set. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.008>

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. *Diário Oficial da União*: Seção 1, Brasília, 2024, p. 46-47. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html>

CALLEN, H. B. *Termodinâmica e uma introdução à termostatística*. 2ª ed. Wiley, 1985.

CASTILLO, Pável César Hernández Del et al. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, [s. l.], v. XIII, n. 3, p. 293-306, Setembro 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2012.13n3.028>

CASTELLAN, G. *Fundamentos de Físico-Química*. LTC, Rio de Janeiro, 1986.

CATALUÑA, Renato; SILVA, Rosângela. Desenvolvimento de um equipamento para avaliação do efeito do etanol na pressão de vapor e entalpia de vaporização em gasolinas automotivas. *Química Nova*, v. 29, p. 580-585, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000300029>

GEROLA, Adriana Passarella; PELOI, Lilian Somenci; HIOKA, Noboru; SANTIN FILHO, Ourides; KATO, Lilian Akemi. Determinação da entalpia de vaporização de líquidos pelo método do isotenisópio de Smith e Menzies. *Química Nova*, v. 33, n. 2, p. 482-488, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000200043>

GRANER, Laerte; GARCIA, Irineu Secolo; JR., Henry Joseph. Estudo comparativo dos hidrocarbonetos emitidos pelo gás de escape de

um veículo flex quando abastecido com E22 e com E100. In: *Anais do XXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva — SIMEA 2013*. São Paulo: Blucher, 2014. p. 89-101. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/engpro-simea-PAP13>

KAR, Kenneth et al. Measurement of vapor pressures and enthalpies of vaporization of gasoline and ethanol blends and their effects on mixture preparation in an SI engine. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, Auckland, v. 1, n. 1, p. 132-144, 26 ago. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2008-01-0317>

KRÜGER, L.; TUCHSCHEERER, F.; MANDEL, M.; MÜLLER, S.; LIEBSCH, S. Corrosion behaviour of aluminium alloys in ethanol fuels. *Journal of Materials Science*, v. 47, p. 2798–2806, 15 nov. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-011-6108-1>

LOU, Xiaoyuan; SINGH, Preet M. Role of water, acetic acid and chloride on corrosion and pitting behaviour of carbon steel in fuel-grade ethanol. *Corrosion Science*, n. 52, p. 2303–2315, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.034>

MELO, André de Souza; SAMPAIO, Yony de Sá Barreto. IMPACTOS DOS PREÇOS DA GASOLINA E DO ETANOL SOBRE A DEMANDA DE ETANOL NO BRASIL. *Revista de economia contemporânea*, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 57-83, jan./abr. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/141598481813>

NETO, A. F. G. et al. Thermodynamic analysis of fuels in gas phase: ethanol, gasoline and ethanol — gasoline predicted by DFT method. *Journal of Molecular Modeling*, v. 21, n. 267, 19 set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00894-015-2815-x>

QUIROGA, Luis Carlos Rios. Avaliação da relação entre a energia de ativação e a energia útil para diferentes misturas de etanol e gasolina aplicados a motores de ignição por centelha. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016. Disponível em:



<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/fl4dcbb6-295c-42df-a2e8-26ed330d19cf>

SETIYO, Muji; NUGROHOA, Rifqi; KARMIADJI, Djoko Wahyu; JAMINA, Abdul Wahid. The effect of ethanol on fuel tank corrosion rate. *Jurnal Teknologi*, v. 80, n. 6, 5 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11113/jt.v80.12324>

SHIKIDA, Pery Francisco Assis; PEROSA, Bruno Benzaquen. Álcool combustível no Brasil e path dependence. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 50, n. 2, p. 243-262, junho 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032012000200003>

SILBEY, R. J.; BAWENDI, M. G. *Química Física*. 4ª ed. Wiley, 2001.

SOUSA, Raphael Bellis de; FERREIRA, Vanderlei Rodrigues; ABRANTES, Rui de; BORSARI, Vanderlei. A influência do etanol combustível na emissão de etanol, aldeídos e hidrocarbonetos expelidos pelo escapamento em veículos leves. In: *Anais do XXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva — SIMEA 2013*. São Paulo: Blucher, 2014. p. 353-371. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/engpro-simea-PAP47>

VILANOVA, Luciano Caldeira. Efeitos da adição de etanol hidratado no combustível e do sistema de formação da mistura no desempenho e nas emissões de um motor biocombustível brasileiro. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10325

XUAN, Thanh Dinh; MINH, Dien Vu; HOA, Binh Pham; DUC, Khanh Nguyen; DUY, Vinh Nguyen. Influence of ethanol-gasoline blended fuel on performance and emission characteristics of the test motorcycle engine. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 72, n. 8, p. 895-904, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10962247.2022.2064003>