

RELATÓRIO CICLO OTTO

**GT-ECF
ESPECIFICAÇÃO DO
COMBUSTÍVEL DO FUTURO**

22 DE JUNHO DE 2022

**GT – ESPECIFICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO
COORDENAÇÃO: MME/ANP**



Relatório do GT-ECF

Especificação do Combustível do Futuro

COMPONENTES
DO GT-ECF

O GT – ESPECIFICAÇÃO DO
COMBUSTÍVEL DO FUTURO
CONTOU COM A
PARTICIPAÇÃO DE
REPRESENTANTES DE
GOVERNO, INICIATIVA
PRIVADA, ACADEMIA E
EXPERTS DA ENGENHARIA
AUTOMOTIVA NACIONAL.

AEA
ANFAVEA
ANP
CETESB
EPE
FNS
FGV-ENERGIA
IBAMA
IBIO
IBP
ICCT
IEMA
IMT
MAPA
MECON
MME
PETROBRAS
POLITÉCNICA
SAE-BRASIL
SINDIPEÇAS
UFABC
UFES
UNICA
UNICAMP
USP-SÃO CARLOS

Coordenação MME/ANP:

ANP – Ednéia Caliman

MME – Marlon Arraes Jardim

Estrutura do Documento

1. Introdução
 - a) Histórico PCF, criação do GT ECF e principais objetivos
 - b) Descrição das reuniões
2. Análise Bibliográfica dos Fundamentos para a ECF
 - a) Levantamento dos estudos e artigos que fundamentam combustíveis de alta octanagem e baixa intensidade de carbono (98-102)
 - b) Características dos combustíveis de alta performance para os motores de combustão interna (98-102)
 - c) Levantamento de motores que utilizam combustível de alta octanagem
3. Perspectivas da indústria automotiva para desenvolvimento de tecnologias de propulsão para veículos leves
 - a) Tendência de desenvolvimento da indústria automotiva para novos motores de combustão interna
 - b) Perfil da frota brasileira circulante
 - c) Perfil da frota brasileira no horizonte a curto (2027) e médio prazo (2032)
 - d) Requerimentos de combustíveis para os novos motores
 - e) Tipos necessários de avanços para os motores
 - i. Modificações simples
 - ii. Modificações disruptivas
4. Impacto do Combustível do Futuro na Produção de Combustíveis Derivados de Petróleo
 - a) Análise comparativa das especificações de gasolina A (Europa, EUA, Brasil entre outros mercados relevantes);
 - b) Avaliação das alternativas para a melhoria da especificação da gasolina;
 - c) Potencial de produção (oferta) da gasolina A nas alternativas propostas.

5. Distribuição

- a) Potenciais impactos da adoção do Combustível do Futuro na distribuição
- b) Opções de cronograma/fases para a adoção do Combustível do Futuro
- c) Alternativas para oferta do Combustível do Futuro para o consumidor

6. Conclusão - Proposição de Políticas Públicas

- a) Nova especificação dos combustíveis de alta octanagem e baixa intensidade de carbono para o Ciclo-Otto
- b) Cronograma de implementação do Combustível do Futuro

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 O Programa Combustível do Futuro, criação do GT ECF e principais objetivos:

O Grupo de Trabalho de Especificação do Combustível do Futuro (GT-ECF) é parte integrante do Subcomitê do Ciclo Otto, no âmbito do Comitê Técnico do Programa Combustível do Futuro. Este GT foi coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em conjunto com a Agência de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), contando ainda com a participação de representantes da iniciativa privada, academia e experts da engenharia automotiva nacional.

O subcomitê Ciclo Otto do Programa Combustível do Futuro tem, entre seus objetivos, a especificação de gasolina de alta octanagem, visando a menor emissão com maior eficiência energética. Esse objetivo está alinhado com a meta do Programa, de incrementar a **utilização de combustíveis sustentáveis de baixa intensidade de carbono, bem como da tecnologia veicular, com vistas à descarbonização da matriz energética de transporte nacional ao menor custo para a sociedade brasileira.**

Para se obter os ganhos esperados, é necessário estabelecer uma cronologia de ações, de modo que toda a cadeia da indústria automotiva e de combustíveis trabalhe de forma encadeada em relação ao objetivo comum de proporcionar ao consumidor veículos leves de maior eficiência energética, menor emissão ao menor custo.

Dessa forma, além da definição das metas de eficiência energética e de redução de emissões, a primeira etapa do processo de descarbonização passa pela determinação da tecnologia de motor que irá atender à mudança proposta e, na sequência, na especificação do combustível que melhor irá atender a essa nova tecnologia de motor.

Cabe registrar que já existem várias tecnologias disponíveis, que poderiam ser implantadas de forma ampla nos veículos do ciclo Otto, independente da alteração da qualidade do combustível, com redução significativa da emissão de CO₂, embora ganhos ainda maiores possam e devam ser obtidos com o aperfeiçoamento das especificações do combustível utilizado no país.

Vários estudos que avaliam os impactos no aprimoramento da especificação do combustível em termos de ganhos de eficiência foram analisados pelos integrantes do GT-ECF. Duas situações são especialmente críticas em relação a esses impactos: 1) condição simultânea de alta carga e baixo giro do motor; e 2) plena carga e alto giro. Com relação à primeira situação, altamente frequente nos centros urbanos atuais, verificam-se ganhos potenciais significativos com a mudança da especificação do combustível, com

melhora de rendimento e redução das emissões. Já na segunda situação, a plena carga com alto giro, a mudança de qualidade do combustível tem menor impacto em ganhos de eficiência, uma vez que tal ganho só é verificado em situações de dirigibilidade voltada para alta performance (velocidade), o que não representa o comportamento típico dos usuários de veículos em uso real urbano ou em estrada.

Especificamente em relação à octanagem, inicialmente sugerida no subcomitê com valor mínimo de 102 para a característica número de octano pesquisa (RON), o uso atual desse tipo de combustível (*superpremium*) apenas é verificado em nichos específicos, correspondendo a volumes pouco significativos em relação ao consumido mundialmente.

No Capítulo II serão descritos, em mais detalhes, cada item abordado no decorrer da ampla discussão técnica que norteou a construção das diretrizes para a especificação do combustível do futuro para o ciclo Otto, bem com as referências técnicas consultadas. Para a construção desse capítulo foi solicitado aos componentes do grupo que se organizassem em subgrupos, de acordo com usas expertises e áreas de atuação.

Assim, o tópico relativo à análise bibliográfica dos fundamentos para se definir a especificação do combustível do futuro ficou a cargo da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA), juntamente com os representantes da União da Indústria de Cana-de-açúcar e Bioenergia (UNICA) e da Petrobras. O capítulo que abordou a perspectivas da indústria automotiva para desenvolvimento de tecnologias de propulsão para veículos leves foi elaborado conjuntamente por representantes da Associação Nacional do Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Por último, ficou sob responsabilidade do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP) a tarefa de trazer para o documento as contribuições relativas aos potenciais impactos desse novo combustível para o setor de distribuição.

Por fim, coube à ANP e ao MME a tarefa de construção do presente relatório, o qual contempla, além da consolidação de todas as contribuições recebidas, um breve relato das ações do grupo. Adicionalmente, também foram incluídas, ao final do documento, as principais conclusões e diretrizes decorrentes do trabalho executado pelo grupo.

1.2 Descrição das reuniões

As atividades do Grupo de Trabalho (GT) tiveram início em setembro de 2021, quando se deu a primeira reunião. Ao todo, foram realizadas 7 reuniões virtuais, contando sempre

com a participação de representantes dos diferentes setores envolvidos na construção do presente documento.

As reuniões tiveram como enfoque o debate acerca da problemática a ser tratada pelo grupo, qual seja, a oferta de combustível de alta octanagem e baixo carbono para o mercado de combustível voltado para o ciclo Otto, visando menor emissão com maior eficiência energética. O exercício incluiu não apenas a avaliação das características da frota atual de veículos, a fim de se estimar o potencial benefício que lhe seria trazido por esse novo combustível, mas também a perspectiva de evolução dessa frota, em um cenário de curto e médio prazo.

No campo da mobilidade, o movimento mundial em direção à redução das emissões de gases de efeito estufa tem concentrado esforços na migração do perfil de motorização da frota veicular, do atual motor de combustão interna, para veículos tipicamente elétricos. No entanto, a adoção da eletromobilidade no transporte brasileiro tem evoluído de forma bastante incipiente, haja vista as inúmeras barreiras associadas não só à produção de veículos e componentes, mas também à falta de infraestrutura de recarga.

Um estudo recente, realizado pela em conjunto pela ANFAVEA e a *Boston Consulting Group* (BCG) [1], mostrou que, mesmo em uma perspectiva de convergência global, alinhado ao que vem sendo praticado nos países mais desenvolvidos, o Brasil teria, em 2030, apenas 4% de sua frota eletrificada e, em 2035, atingiria cerca de 18% de eletrificação. Isso deixa claro que os motores a combustão interna ainda terão, por bastante tempo, um papel extremamente relevante na matriz veicular brasileira.

Dessa forma, considerando-se o perfil da frota circulante que se espera em um cenário de curto e médio prazo, e a necessidade de se buscar combustíveis menos poluentes para os motores de combustão interna, buscou-se, no âmbito deste GT, identificar pontos de aprimoramento na especificação dos combustíveis atualmente disponíveis para motores ciclo Otto, que pudessem viabilizar a introdução de novas tecnologias veiculares no mercado brasileiro. Para tanto, foram levantados diversos artigos científicos e documentos técnicos relacionados ao tema. Cada um desse trabalhos, os quais são listados nas referências desse documento, trouxeram informações e dados importantes que embasaram não apenas as discussões, mas também as tomadas de decisões do grupo.

A despeito de haverem diferentes parâmetros que possam ser alterados no combustível, a fim de melhorar sua qualidade, a grande maioria dos trabalhos indica a octanagem como principal característica a ser aprimorada, quando se busca aumento de eficiência

energética do combustível para ciclo Otto. Nesse sentido, após uma extensa avaliação dos trabalhos levantados, passou-se a buscar definir qual seria um valor adequado de octanagem a ser adotado no combustível do futuro, para os veículos do ciclo Otto.

Nesse contexto, a principal preocupação apontada pelo grupo, durante as extensas discussões ocorridas, estava relacionada ao real benefício que seria obtido com a adoção de um combustível de maior octanagem, tendo em vista a frota atual brasileira e a taxa de renovação dessa frota. Isso porque, veículos com tecnologias mais antigas poderiam não obter benefícios quando da utilização de um combustível de maior octanagem.

De um modo geral, as informações contidas na literatura corroboram a percepção de que a evolução do combustível traz consigo uma série de benefícios para o funcionamento dos motores e veículos. Sabe-se, porém, que esses benefícios não são lineares e variam, de forma significativa, a depender da tecnologia envolvida na fabricação dos veículos. Entretanto, é consenso entre a comunidade científica que, via de regra, a melhoria na qualidade do combustível tende a tornar os veículos mais eficientes, contribuindo não apenas para a redução do consumo, mas também para a diminuição nos níveis de emissões de poluentes.

CAPÍTULO II - ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DOS FUNDAMENTOS PARA A ECF

Elaboração: Petrobras, AEA, Anfavea, UNICA

A busca por uma matriz energética mais sustentável deve considerar, entre outros fatores, a utilização de combustíveis que venham a contribuir para a melhoria de eficiência dos veículos que o utilizam, sempre com foco na descarbonização, na diminuição das emissões veiculares e na sustentabilidade.

Sob essa ótica, e tomando como premissa o fato de que o Brasil ainda deverá contar, nos próximos anos, com uma frota circulante composta majoritariamente por veículos a combustão interna, entende-se ser extremamente necessária a busca por combustíveis menos poluentes e mais eficientes do ponto de vista energético. Nesse sentido, muitos são os trabalhos disponíveis na literatura que versam sobre características dos combustíveis que afetam a eficiência e o funcionamento dos motores a combustão interna. Tais efeitos podem ser observados no nível de consumo dos veículos, no desempenho e funcionamento dos motores e, sobretudo, nos níveis de emissões de poluentes.

Uma das principais referências nesse tema é o *Worldwide Fuel Charter* (WWFC)[2], uma publicação técnica elaborada por representantes do setor automotivo de diversos países, e que fornece recomendações de especificação para combustíveis (gasolina e óleo diesel), que variam a depender da legislação e dos níveis de controle de emissões, eficiência energética e/ou redução de CO₂ exigido para diferentes mercados.

A partir de 1º de janeiro de 2022 passou a vigorar, no Brasil, a nova fase L7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e, a partir de 1º de janeiro de 2025, entrará em vigor a fase L8. Os níveis de controle de emissões exigidos para ambas as fases estão em linha com aqueles preconizados pela legislação americana US EPA Tier 3, que guarda certa similaridade com as categorias 4 e 5 do WWFC.

Vários outros trabalhos podem ser identificados na literatura versando sobre fatores que afetam a eficiência dos motores a combustão interna. De um modo geral, o que se depreende desses trabalhos é que esses ganhos de eficiência podem variar significativamente a depender das diferentes tecnologias veiculares. Cada tecnologia pode se beneficiar de forma diferente de eventuais melhorias que sejam incorporadas ao combustível, sendo esse benefício muitas vezes difícil de se mensurar.

Entretanto, de um modo geral, é consenso entre os estudiosos da área que o aprimoramento da qualidade do combustível, tende a aumentar a eficiência dos motores.

Quando se fala em motores do ciclo Otto, apesar de haver vários pontos de possível melhoria nos combustíveis, há um consenso de que o número de octano pesquisa (RON) é a característica que mais tende a afetar positivamente esse ganho de eficiência.

Definições:

- Eficiência térmica do motor: é a quantidade de energia do combustível, em MJ, que pode ser convertida em potência no eixo do motor, em kW, expressa em %;
- Autonomia veicular: é a distância, em km, percorrida por um veículo com uma unidade, em volume, de combustível, expressa em km/l.
- Emissões de CO₂: é a quantidade de CO₂, em massa, que o veículo emite por quilômetro rodado, expressa em g/km;
- Consumo energético em veículo: é a quantidade de energia, em MJ, que o veículo consome por quilômetro rodado, expresso em MJ/km, comumente tratado como eficiência energética do tanque a roda e que deve ser medido em ciclos de condução representativos do uso real.

2.1 Levantamento dos estudos e artigos que fundamentam combustíveis de alta octanagem e baixa intensidade de carbono

CONSIDERAÇÕES SOBRE O WORLD WIDE FUEL CHARTER (WWFC)

O Worldwide Fuel Charter (WWFC)[2] é uma publicação desenvolvida por representantes da indústria automotiva de diversos países, e que fornece recomendações de qualidade para combustíveis (gasolina e óleo diesel), que variam conforme a legislação de controle de emissões, eficiência energética e/ou redução de CO₂ para veículos leves no mercado alvo. Nesse sentido, a última edição do WWFC, de 2019, estabeleceu cinco categorias de controle, dependendo da rigidez do controle de emissões/eficiência energética em diferentes mercados. A seguir é apresentado um descriptivo do tipo de mercado abordado em cada categoria:

- categoria 2: mercados com alguns requisitos para controle de emissões, como US Tier 1, Euro 2, Euro 3, ou padrões de emissões equivalentes ou outras demandas de mercado;
- categoria 3: mercados com mais requisitos no controle de emissões, como US LEV, LEV Califórnia ou ULEV, Euro 4, JP 2005, ou padrões de emissões equivalentes ou outras demandas de mercado;

- categoria 4: mercados com requisitos avançados no controle de emissões, cujos combustíveis viabilizam tecnologias sofisticadas de pós-tratamento de NOx e material particulado, como US Tier 2, US Tier 3, California LEV II, Euro 4, Euro 5, Euro 6/6b, JP 2009, ou padrões de emissões equivalentes ou outras demandas de mercado;
- categoria 5: mercados com requisitos altamente avançados para controle de emissões (incluindo gases de efeito estufa) e eficiência de combustível, visando minimizar as emissões reais de condução (*RDE - Real Driving Emissions*), tais como: US Tier 3 Bin 5, Califórnia LEV III, China 6a, China 6b, ou padrões de emissões equivalentes ou outras demandas de mercado;
- categoria 6: mercados com potencial controle de emissões e eficiência de combustível mais rigorosos do que os da categoria 5, como por exemplo a antecipação de metas americanas e europeias, de forma a permitir a introdução de motores e veículos com maior eficiência de combustível e menor emissão de gases de efeito estufa, bem como especificar uma gasolina com menor intensidade de carbono. Esta categoria visa minimizar as emissões reais de condução necessárias para o Euro 6dTEMP (a partir de 2017), Euro 6d (a partir de 2020) e China 6b (a partir de 2023).

A categoria 1, presente em versões anteriores do WWFC, foi descontinuada a partir da sexta edição do documento, por representar mercados com pouco ou nenhum limite de emissões de poluentes, com requisitos de qualidade defasados ao atualmente aplicado.

A Tabela I a seguir lista, para alguns parâmetros de qualidade, os valores recomendados para o atendimento de cada categoria do WWFC, bem como as legislações de controle de emissões compatíveis com o mercado descrito em cada categoria.

Tabela I. Valores recomendados pelo Worldwide Fuel Charter [2].

PARÂMETRO	LIMITE	UNIDADE	Valores recomendados pelo Worldwide Fuel Charter				
			Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 6
			US Tier 1, Euro 2, Euro 3	US LEV, LEV Califórnia, ou ULEV, Euro 4, JP 2005	US Tier 2, US Tier 3, California LEV II, Euro 4, Euro 5, Euro 6/6b, JP 2009	US Tier 3 Bin 5, Califórnia LEV III, China 6a, China 6b	Euro 6dTEMP (de 2017), Euro 6d (de 2020) e China 6b (de 2023)
RON	mínimo	-	91,0 95,0 98,0	91,0 95,0 98,0	91,0 95,0 98,0	95,0 98,0	98,0 102,0
MON	mínimo	-	82,5 85,0 88,0	82,5 85,0 88,0	82,5 85,0 88,0	85,0 88,0	88,0 88,0
Teor de oxigênio	máximo	% m/m	2,7	2,7	2,7	3,7	3,7
Teor de hidrocarbonetos olefínicos	máximo	% v/v	18,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teor de hidrocarbonetos aromáticos	máximo	% v/v	40,0	35,0	35,0	35,0	35,0
Teor de benzeno	máximo	% v/v	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0
Massa específica	faixa	kg/m ³	715 a 770	715 a 770	715 a 770	720 a 775	720 a 775

Quanto aos valores listados de número de octano (RON), é importante ressaltar que em cada categoria são recomendados *grades* de octanagem para compor o mercado alvo, de forma que estejam compatíveis com o respectivo nível de controle de emissões. Por exemplo, a categoria 6 recomenda a disponibilidade de dois grades de combustível (RON 98 e 102), sem sugerir a proporção de cada um no respectivo mercado alvo. Ou seja, a categoria 6 do WWFC não descreve um combustível com RON mínimo 98 e máximo 102.

Para as categorias 2 a 4, há a ressalva de que os três *grades* de octanagem foram definidos visando aumentar a flexibilidade do mercado, de forma que a disponibilidade dos três no mercado não é requerida (nota 1 nas páginas 5 a 7, da 6^a edição do WWFC).

Vale destacar também que a diferença na qualidade do combustível ao se passar da categoria 5 para a 6 do WWFC (mais restritivas) consiste na disponibilização, no mercado, de um grade de gasolina com RON 102, compatível com metas futuras de emissões e eficiência energética americanas, Euro 6dTEMP (a partir de 2017), Euro 6d (a partir de 2020) e China 6b (a partir de 2023). Como, na prática, a renovação de uma frota veicular ocorre de forma gradual, espera-se que grades de combustível com número de octano mais elevado sejam introduzidos também de forma gradual, para atender novos veículos mais eficientes, coexistindo com números de octano mais baixos.

Como mencionado anteriormente, a legislação americana US EPA Tier 3 é compatível com a categoria 4 e 5 do WWFC. Desde agosto de 2021, tramita no congresso dos Estados Unidos um projeto de lei visando a promoção de combustíveis com baixa intensidade de carbono e alto número de octano (H.R. 5089: *Next Generation Fuels Act of 2021*). Em seu

escopo, está prevista a disponibilização, para veículos novos, de gasolina com RON mínimo 95 e 25% v/v de etanol, em 2026, e de gasolina com RON mínimo 98 e 30% v/v de etanol, em 2031.

O Brasil iniciará a primeira fase do Proconve L8 em 2025, sendo a última fase prevista para 2029 (veículos de passageiros) e 2031 (veículos leves comerciais). O Proconve L8 não é totalmente compatível com a legislação americana US EPA *Tier 3* (cat. 4 e 5 do WWFC) por adotar durabilidade de emissões de 160.000 km em vez de 160.000 milhas, por não utilizar ciclos adicionais de homologação e por estabelecer limites mais brandos de NMOG+NOx.

Quanto ao teor de oxigênio, o limite de 2,7% m/m estabelecido para as categorias 2 a 4 está equivalente ao proposto na norma europeia EN 228. Para mercados em que está autorizado o uso de 10% v/v de etanol, tanto a EN 228 quanto o WWFC entendem que esse limite pode ser flexibilizado para 3,7% m/m (equivalente a 10% v/v de etanol). Para a categoria 6, entende-se que o emprego de teor de etanol em quantidades mais elevadas é requerido para se alcançar maiores octanagens, de forma que o valor limite de 3,7% m/m pode ser flexibilizado até no máximo 8% m/m, equivalente a 20-22% v/v de etanol, porém somente para veículos projetados para esse tipo de combustível (nota 5 da página 9, da 6^a edição do WWFC). Dessa forma, o teor de etanol praticado no Brasil (27% v/v em 2021) fica acima da faixa recomendada pelo WWFC para o teor de oxigenados.

Os parâmetros aqui apresentados não esgotam as recomendações de qualidade do WWFC, de forma que, ao se propor um combustível baseado em determinada categoria do WWFC, deve ser considerado o atendimento a todos os parâmetros de qualidade recomendados, e não apenas ao número de octano ou outra propriedade de interesse.

Portanto, no Brasil, são necessários estudos experimentais específicos para identificar, a partir das metas futuras de emissões de poluentes e das metas de eficiência energética a serem regulamentadas no país, quais seriam as características dos combustíveis mais adequadas às tecnologias de motores que venham a ser implantadas pela indústria automobilística.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO DO JEC SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EUROPEIA DO TANQUE À RODA

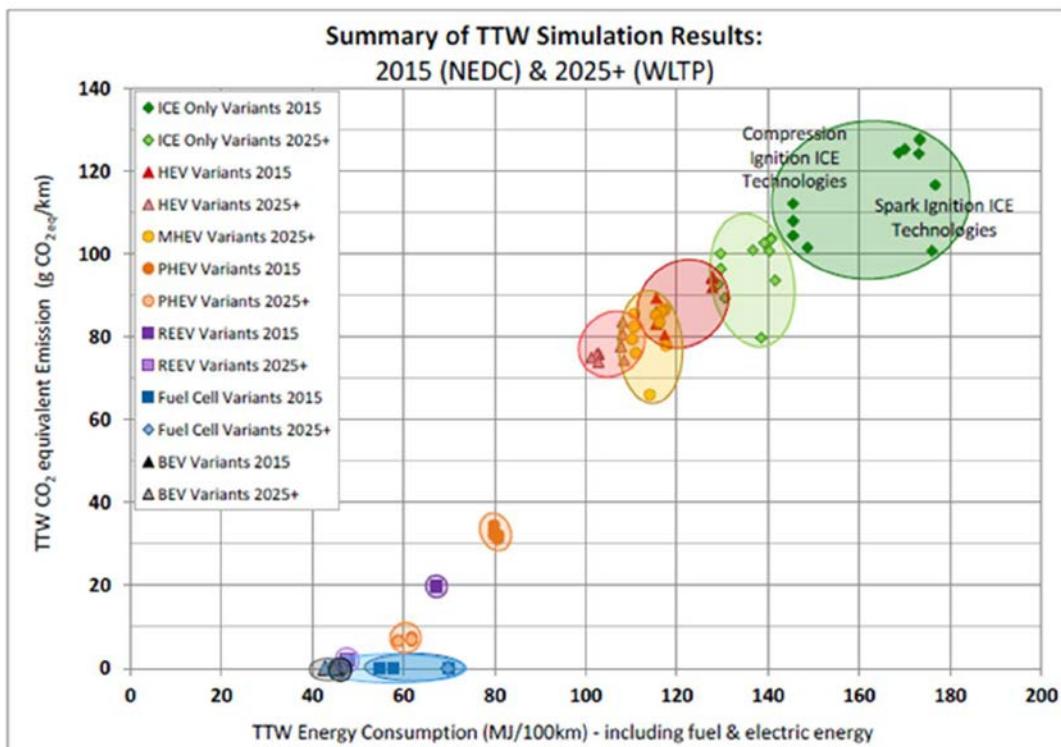
O estudo de 2020, pelo consórcio do JEC (*Joint Research Centre da Comissão Europeia, Eucar e Concawe*) contempla a avaliação de diferentes tecnologias de veículos leves, operando com diferentes combustíveis, em ensaios padronizados de medição de

consumo de combustível, consumo energético e emissões de CO₂ por quilômetro rodado. É um trabalho que compara, por meio de simulações computacionais, dois momentos relativos às legislações de eficiência energética, sendo o ano de 2015 relativo à situação atual e 2025+ representando as legislações futuras. [3]

Dois pontos merecem destaque, a comparação dos ganhos de eficiência proporcionados pelas diferentes tecnologias veiculares e a comparação da eficiência focada nos motores a combustão interna (*internal combustion engines - ICE*), com diferentes combustíveis, em dois momentos, o atual (2015) e o futuro (2025+), com as tecnologias dos motores adequadas ao atendimento das legislações europeias.

Na Figura 1, observa-se o salto de redução de emissões de CO₂ eq, do tanque à roda, ao se substituir as tecnologias veiculares, partindo do ICE até os veículos elétricos à bateria, passando pelos veículos com motorização híbrida em diferentes graus de eletrificação.

Figura 1. Emissões de CO₂ eq, do tanque à roda (TTW) [3]



Quanto aos combustíveis, será dada ênfase na comparação dos produtos para motores ICE, quais sejam: Gasolina E5 (RON 95), Gasolina E10 (RON 95), Gasolina de alta octanagem (*High Octane Fuel – HOF*) spec #1 (RON 100), Gasolina HOF spec #2 (RON 102) e etanol E100 (RON 108), que estão mostrados na Tabela II.

Tabela II. Propriedades dos combustíveis [3].

Fuel Type	Density	RON / CN	LHV	Elemental composition of Carbon
	kg/m ³ i.N.*	---	MJ/kg	%m
Gasoline E5	745,8	95	42,3	84,7
Gasoline E10	748,3	95	41,5	82,8
Gasoline High Octane spec. #1	761,0	100	42,4	84,8
Gasoline High Octane spec. #2	759,0	102	41,6	83,3
Diesel B0	832,0	51,0	43,1	86,1
Diesel B7 market blend	836,1	53,0	42,7	85,4
LPG	550,0	---	46,0	82,4
CNG	0,775	82**	48,0	73,5
E100	794,0	108,0	26,8	52,2
FAME	890,0	56,0	37,2	77,3
DME	670,0	55,0	28,4	52,2
FT-Diesel	780,0	70,0	44,0	85,0
HVO	780,0	70,0	44,0	85,0
Hydrogen	0,084	#	120,0	---

* All values are related to standard conditions according to DIN 1343 & ISO 2533;

**) Methane number based on EN 16723

Quanto às tecnologias dos motores a combustão interna, usado como modelo para representar a frota atual (2015), o trabalho cita características genéricas, tais como motor 1,4 litros, 4 cilindros. Na Tabela III, observa-se um detalhamento maior citando, além dos dados anteriores, tratar-se de motor GDI (*Gasoline Direct Injections*) turbo, com duplo comando de válvulas variável e taxas de compressão de: 10:1, usando E5 e E10; 11:1, usando HOF spec#1; e 11,5:1, usando HOF spec #2. As demais configurações de projeto e operacionais são mantidas constantes para possibilitar a comparação de consumo e eficiências nas mesmas bases.

Tabela III. Especificação de motores de combustão interna – 2015 [3].

2015 ICE Specifications		DISI, Hybrid DISI, PHEV50 SI					REEV100 SI	DICI, Hybrid DICI, PHEV50 CI
		Gasoline E5, Gasoline E10, LPG	Gasoline High Octane spec. #1	Gasoline High Octane spec. #2	CNG	E100	Gasoline E5, E10, Gasoline High Octane, E100	Diesel B0, Diesel B7, FAME, DME, FT-Diesel, HVO
ICE Type / Technology	---	- TGDI - DVVT - Compression Ratio 10.0					- NA - High-expansion Atkinson cycle - Cooled EGR	- Common Rail - Cooled HP-EGR - VGT Turbocharger - Close coupled LNT / cDPF
Measures for alternative fuel usage	---	#	- Increased Compression to 11.0 - Adapted Calibration	- Increased Compression to 11.5 - Adapted Calibration	- Increased Compression to 11.0 - Adapted Calibration - Change of Fuel Injection (PISI)	- Adapted Calibration	#	#
Displacement	L	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	1,6
No. of Cylinders	---	IL4	IL4	IL4	IL4	IL4	IL3	IL4
No. of Strokes	---	4	4	4	4	4	4	4
Specific Power	kW/L	~85	~85	~85	~85	~85	~39	~53
Maximum Power @ speed	kW (PS) / rpm	91 @ 4000	91 @ 4000	91 @ 4000	91 @ 4000	91 @ 4000	47 @ 5000	85 @ 4000
Maximum Torque @ speed	Nm / rpm	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	95 @ 4000	300 @ 1500-2500
Maximum Speed	rpm	6000	6000	6000	6000	6000	6000	5000

Quanto às tecnologias dos motores a combustão interna usados como modelo para representar a frota futura (2025+), o trabalho cita características genéricas, tais como motor 1,5 litros, 4 cilindros em linha, GDI turbo e transmissão manual de 6 marchas. Praticamente a mesma descrição do motor de 2015, a menos da cilindrada um pouco maior.

No entanto, na Tabela IV, observa-se um detalhamento maior, citando além dos dados anteriores tratar-se de:

- GDI turbo com ciclo Miller e com duplo comando de válvulas variável;
- Taxa de compressão de 12:1 – operando com E5 e E10;
- Taxa de compressão de 13:1 – operando com HOF spec#1;
- Taxa de compressão de 13,5:1 – operando com HOF spec#2;
- GPF – Filtro de particulados de Gasolina e Conversor catalítico de 3 vias;
- EGR refrigerado (LP e HP) e resfriador de ar de admissão;
- Sem correias (*beltless*).

Tabela IV. Especificação de motores de combustão interna ciclo Otto - 2025+ [3].

2025+ SI ICE Specifications		DISI DISI MHEV					Hybrid DISI PHEV100 DISI	REEV200 SI
		Gasoline E5, Gasoline E10, LPG	Gasoline High Octane spec. #1	Gasoline High Octane spec. #2	CNG	E100	Gasoline E5, E10 Gasoline High Octane, E100	Gasoline E5, E10 Gasoline High Octane, E100
ICE Type / Technology	---			<ul style="list-style-type: none"> - TGDI - Miller with DVVT - Compression Ratio 12.0 - VTG - Integrated exhaust manifold (water cooled) - GPF - 3 Way Catalyst - Cooled EGR (LP or HP) - Water charge air cooler - Beltless 			<ul style="list-style-type: none"> - TGDI - Miller DVVT - VTG - CR ~ 12.5 to 14.0 - Integrated exhaust manifold (water cooled) - GPF - 3 Way Cat. - Cooled EGR (LP) - Water charge air cooler - Beltless 	<ul style="list-style-type: none"> - Atkinson - CR 14.0 to 16.0 - Cooled low temperature EGR - Isolated Intake - Extremely Low Friction
Measures for alternative fuel usage	---	#	<ul style="list-style-type: none"> - Increased CR of 13.0 - Adapted Calibration 	<ul style="list-style-type: none"> - Increased CR of 13.5 - Adapted Calibration 	<ul style="list-style-type: none"> - Increased CR of 14.0 - Adapted Calibration - Change to CNG Direct injection - GPF removed 	- Adapted Calibration	In case of Gasoline High Octane: Increased CR and adapted Calibration	In case of Gasoline High Octane: Increased CR and adapted Calibration
Displacement	L	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
No. of Cylinders	---	IL4	IL4	IL4	IL4	IL4	IL3	IL3
No. of Strokes	---	4	4	4	4	4	4	4
Specific Power	kW/L	~65	~65	~65	~65	~65	65	40
Maximum Power @ speed	kW (PS) / rpm	98 @ 5500	98 @ 5500	98 @ 5500	98 @ 5500	98 @ 5500	78 @ 4000	49 @ 5000
Maximum Torque @ speed	Nm / rpm	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	240 @ 1500-3500	181 @ 2000-4000	95 @ 2000-5000
Maximum Speed	rpm	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000

Na análise de resultados da simulação, mostrados na Tabela V, observa-se o ganho ponderado de redução do consumo energético em 20,8% obtido somente com a evolução da tecnologia dos motores a combustão interna, da fase atual da frota circulante na Europa para a fase a partir de 2025.

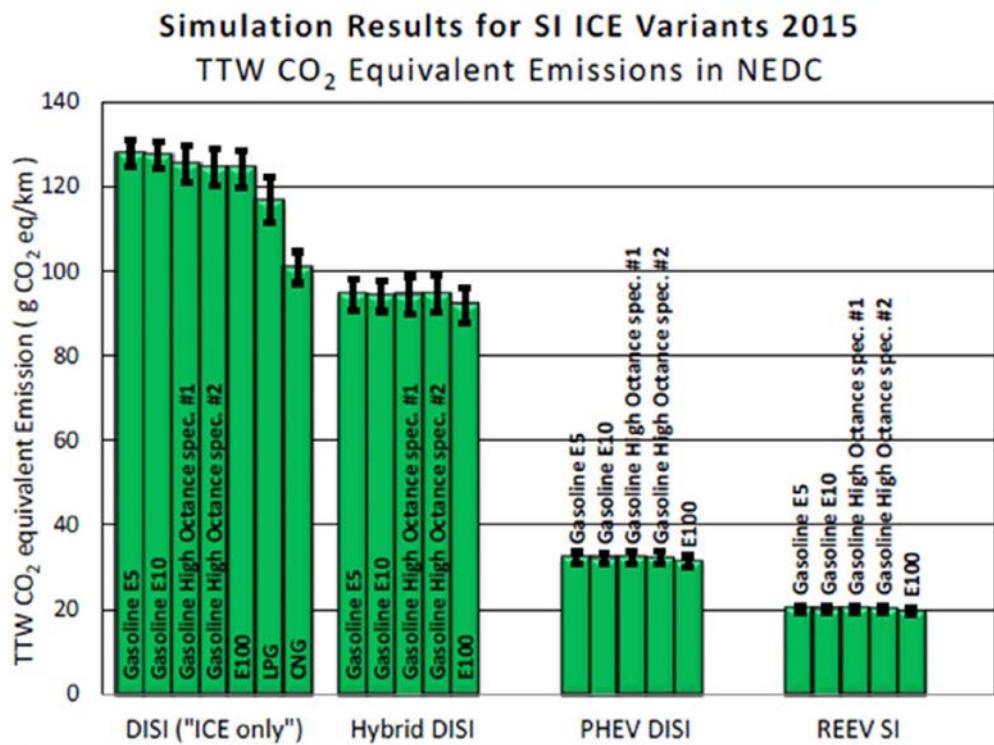
Tabela V. Evolução tecnológica dos motores a combustão interna [3].

Technology Walk for DISI Baseline Powertrain Variant DISI BASE 2015 (NEDC) → DISI BASE 2025+ (WLTP)		NEDC 2015	WLTP 2025+	Potential
		Specific component Cycle Energy Losses		Relative weighted Improvement
		kJ/km	kJ/km	%
Engine	New ICE 2025+	1339,1	979,3	20,8%
Transmission	Higher specific energy throughput in WLTP overcompensates improved gearbox Improved gear lubrication for reduction of churning losses The increased energy throughput in WLTP still rises the specific energy demand	49,8	54,2	-0,3%
Auxiliaries	Auxiliaries supplied by recuperation via ~4kW Starter Generator A 12V starter generator of ~4kW max. power allows generation of electric energy from recuperation to fully supply the electrified auxiliaries in 2025+.	35,8	0	2,1%
Rolling Resistance	Higher test mass in WLTP overcompensates weight reduction The curb weight of the vehicle has been reduced by 110kg for 2025+. However the test weight definitions in WLTP still lead to a higher test weight in 2025+.	89,9	92,7	-0,2%
Air Resistance	Higher average velocity in WLTC overcompensates improved aerodynamics Reduction of Air drag coefficient from 0.28 to 0.25 Increased average speed overcompensates improvements in aerodynamics	129,4	168,6	-2,3%
Braking Energy	Higher braking demand in WLTP Due to the change to the more dynamic WLTC more energy is lost inside the brakes	83,5	108,5	-1,4%
Sum		1727,5	1403,3	18,8%

Considerando os resultados de simulação das emissões de CO₂ equivalente do tanque à roda para os diferentes combustíveis, mostrados na Figura 2, observa-se uma tendência

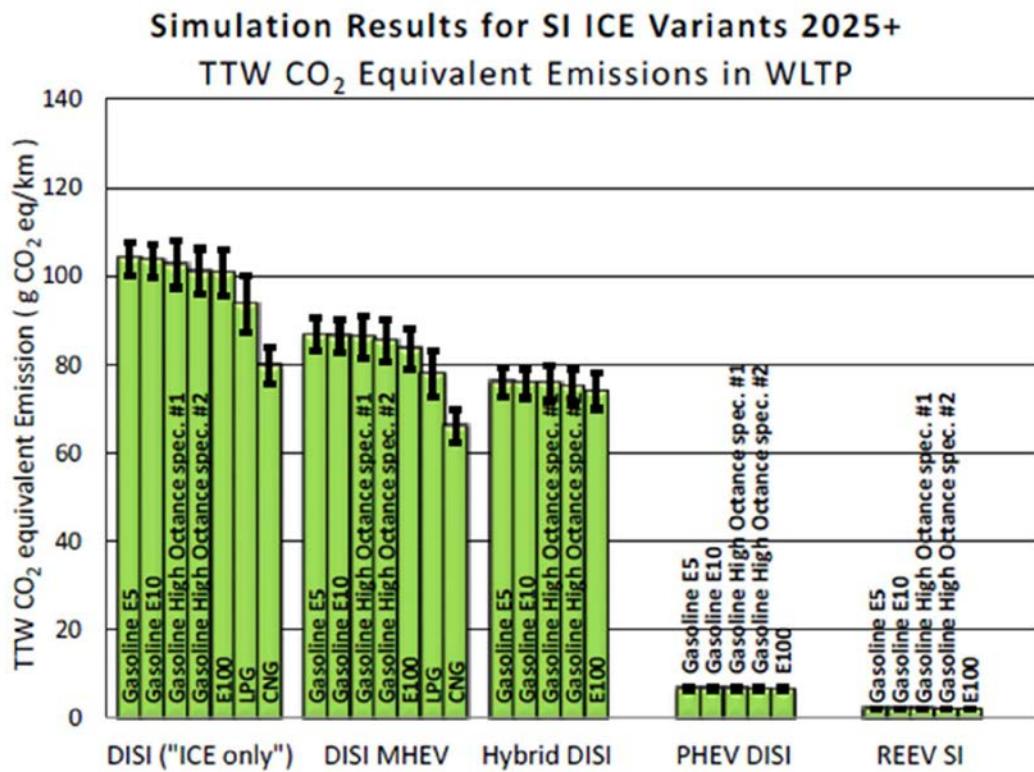
discreta de redução média das emissões utilizando os combustíveis E5, E10, HOF#1, HOF#2 e E100. No entanto, as barras de incerteza de cada resultado, mostradas na figura abaixo, indicam que os resultados estão dentro da faixa dos erros estimados no modelo de simulação. Outro fator a destacar é o significativo salto de redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) obtido com a troca de tecnologia de motores de 25%, 75% e 85%, para os veículos híbridos, híbridos plugin e elétricos de range estendido, respectivamente.

Figura 2. Simulação das emissões de CO₂ equivalente do tanque à roda – 2015 [3].



Para a frota futura de motores a gasolina de injeção direta (2025+ DISI “ICE Only”), os resultados de simulação das emissões de CO₂ equivalente do tanque à roda, mostrados na Figura 3, mostram que não há diferenças entre os combustíveis testados (E5, E10, HOF#1, HOF#2 e E100) quando considerados os erros estimados no modelo de simulação. Em 2025+ também cabe destacar o significativo salto de redução das emissões de GEE obtido com a troca de tecnologia de motores indo em direção à eletrificação.

Figura 3. Simulação das emissões de CO₂ equivalente do tanque à roda – 2025+ [3].



2.2. Características dos combustíveis de alta performance para os motores de combustão interna

Elaboração: AEA

- **RON desejado**

A característica de RON é aquela que permite o uso de uma relação de compressão (Rc) mais alta de motores dotados de tecnologia moderna, cuja tendência será discutida em outro tópico. Devido ao compromisso entre o aumento do rendimento térmico com o aumento da Rc e a redução do rendimento mecânico devido à força exigida nos anéis de cilindro da primeira canaleta com o aumento da relação de pressão de combustão, o melhor valor gira em torno de uma Rc geométrica de 14:1 para motores aspirados do ciclo Otto, como demonstrado na página 8 da referência [4], podendo variar para menos devido ao uso de sobrealimentação (turbo compressores).

Para taxas de compressão desta ordem, considerando que para um melhor aproveitamento energético em toda a faixa de operação os motores modernos são, na sua grande maioria, limitados [5], várias referências citam a faixa de RON de 98 a 102 como a que propicia a eficiência desejada para os motores modernos no futuro [6]; [7]; [8]; [9]; [10]; [11]; [12]; [13]; [14].

- **Formulações dos Combustíveis de Alta Eficiência**

A maior parte das referências destacam a necessidade de blends com combustíveis renováveis, principalmente o etanol, para a obtenção de combustíveis de alta octanagem, com intensidade de carbono reduzida e outras propriedades que, em conjunto, têm efeito positivo na eficiência dos motores [2]. Mercados com potencial controle de emissões e eficiência de combustível são alvos mais rigorosos do que os da categoria 5 do WWFC, necessários para os padrões de emissões de GEE e economia de combustível dos EUA e futuras metas da União Europeia (UE) para o CO₂. Esta categoria visa minimizar as emissões reais de condução (RDE) necessárias para o Euro 6dTEMP (a partir de 2017), Euro 6d (a partir de 2020) e China 6b (a partir de 2023). Esta categoria destina-se a permitir a introdução de motores e veículos com maior eficiência de combustível e menor escape de emissões e especificar uma gasolina com menor intensidade de carbono, permitindo assim maior eficiência e benefícios de GEE do que é possível se alcançar com combustíveis de categorias inferiores. Nos combustíveis para os motores do futuro [15], seis propriedades individuais podem afetar a eficiência nos motores de injeção por centelha (SI): número de octano de pesquisa (RON), sensibilidade ao octano, calor latente da vaporização, velocidade de chama laminar, índice de material particulado e temperatura de luz catalisador (*light off*). Os efeitos relativos de cada uma dessas propriedades de combustível são combinados em uma função de mérito unificado que é capaz de avaliar o potencial de eficiência baseado em propriedade de combustíveis com composições convencionais e não convencionais. [16]

Os relatórios de 2018 a 2020 do projeto Co-optima ([17]; [18]; [19]) são ricos em detalhes de propriedades, resultado de testes e metodologias de ensaios de diferentes misturas de combustíveis buscando estas características, e um bom resumo dos resultados pode ser encontrado em vários trabalhos derivados deste programa, tais como os da referência [20], que resume as propriedades dos melhores candidatos, sendo que misturas de 25 a 40% de etanol com gasolina foram consideradas as mais promissoras. A porcentagem ideal é dependente do tipo de gasolina utilizada. O valor de RON mínimo perseguido foi de 98, com uma sensitividade de 10. A faixa de RON considerada é de 98 a 102 [4]. O recente relatório da CRC [21] (COORDINATING RESEARCH COUNCIL, INC.) investigou a melhora da eficiência do motor para reduzir o consumo de combustível em 25%, mantendo a autonomia do veículo e com o motor adotando tecnologias mais avançadas combinada com combustíveis de octanas mais elevadas.

Um motor turbinado de injeção direta de produção foi modificado para incorporar uma relação de compressão aumentada (CR) de 9,5 para 11,5, um turbocompressor de dois

estágios e aumento dos níveis de recirculação dos gases de exaustão (*exhaust gas recirculation* – EGR) refrigerado. A octanagem dos combustíveis variou de 92 RON a 102 RON, e o etanol de 0% a 30%. Este tipo de motor e as modificações efetuadas são representativas das principais tendências dos motores modernos no mercado brasileiro, o que responde a última questão proposta. O uso de turbocompressor de dois estágios será a última modificação a ser considerada devido ao seu custo.

- **Ganho de Eficiência no ciclo de ensaio (banco de motores)**

Os trabalhos mais atuais realizados por institutos de pesquisa adotam a linha do desenvolvimento dos motores e combustíveis em conjunto [22]. O melhor resumo dessa tendência pode ser encontrado na referência [23]: A especificação ASTM ([24]; [25]; [26]) especificações de combustíveis de alta octanagem para ensaios de emissões e consumo prevê várias formulações.

Co-otimização do motor/combustível SI

Estimativa básica (NA): (94/86 BOB + 15% ethOH) => RON 91 para 100 (6,2%) – Sensibilidade 8 para 12 (MON 83 para 88) (1,4%) – DHoV 350 KJ/Kg para 85 KJ/Kg (0,3%) – Velocidade de chama 0,43 para 0,46 m/s (1%). Melhora de rendimento térmico de 9%
Estimativa otimista (NA): (98/86 BOB + 30% ethOH) => RON 91 para 105 (9,7%) – Sensibilidade 8 para 16 (MON 83 para 89) (2,8%) – DHoV 195 KJ/Kg (0,8%) – Velocidade de chama 0,43 para 0,46 m/s (1%). Melhora de rendimento térmico de 14,3%

Outros trabalhos foram dirigidos para obter um objetivo pré-definido, como por exemplo manter a autonomia do veículo, isto é, compensar a redução do poder calorífico da mistura com o aumento do rendimento energético [27]. Com um número de octano de pesquisa (RON) de cerca de 100, parece permitir melhorias de eficiência em um sistema de motor/veículo devidamente calibrado e projetado que são suficientes para compensar sua energia de mais baixa densidade (Jung, 2013; Thomas, et al, 2015). Essa melhoria de eficiência compensaria a quilometragem do tanque (intervalo) perda tipicamente observada para misturas de etanol em veículos convencionais de gasolina e combustível flexível (FFVs).

- **Ganho de Eficiência na vida real (nível veicular)**

Os trabalhos realizados com várias metodologias, principalmente na Europa, demonstram que para motores de padrão Euro 5 em diante [28] tem-se ganhos em utilizar combustíveis com octanagem mais elevada que a do projeto original. Poucos modelos não reagem a esta situação, que são aqueles que operam fora da faixa limitada pela detonação, estratégia já abandonada pelos fabricantes após Euro 5.

Na Europa, uma frota bastante similar à brasileira [29], a maioria dos 20 veículos testados no estudo apresentou benefícios de desempenho quando funcionando utilizando combustíveis com RON mais altos. O que apresentou significância estatística mais alta (95% de confiança) foi o benefício do tempo de aceleração de 1,9%, enquanto o maior benefício de energia foi de 3,9% a 2500 rpm para um RON98 versus RON95. O maior benefício de cada veículo foi tipicamente encontrado para a comparação RON91 versus RON98. E o maior benefício na frota de testes foi de 8,7% mais potência para o combustível RON98. Comparando o RON 95 mais relevante do mercado da UE e os combustíveis RON98, o maior benefício, foi de 3,9%.

Testes semelhantes foram conduzidos nos EUA com motores aspirados e sobrealimentados [30]. Os RON foram de 92,4 para o combustível E10 e 100,7 para o combustível E30. Dois veículos tinham motores injetados diretos por gasolina (GDI) e dois com injeção de combustível de porta (PFI). Houve significativa melhora de desempenho em plena carga (WOT) para três dos quatro veículos flex (FFV), com um veículo não mostrando nenhuma mudança. Além disso, um veículo convencional (não-FFV) com um pequeno motor turbinado com injeção direta foi testado com um grau regular de gasolina sem etanol (E0) e uma mistura deste mesmo combustível com 15% de etanol em volume (E15). O RON foi aumentado de 90,7 no E0 para 97,8 na mistura E15. Aceleração com melhora significativa e melhoria do desempenho da eficiência térmica foi medida para este veículo, que alcançou paridade na economia de combustível quase volumétrica no agressivo ciclo de teste US06, demonstrando o potencial para melhorar a economia de combustível em próximas gerações utilizando motores com combustíveis de alta octanagem. A quantificação desses benefícios nos EUA foi feita pela Ford [8].

- **Tecnologia de motor capaz de se explorar esse ganho**

Tanto os relatórios do Co-optima [31] como os do MIT colocam como a tendência dos motores modernos e os mais indicados para se beneficiar de combustíveis de alta octanagem, como sendo os motores turboalimentados de injeção direta, pequenos com

3 cilindros. [32] Montadoras dos EUA estão cada vez mais substituindo motores convencionais ("naturalmente aspirados") por motores menores emparelhado com um turbocompressor, que são capazes de entregar o mesmo poder produção com emissões melhoradas e combustível economia. Um desafio fundamental para realizar o potencial de eficiência máxima destes turbo (ou "impulsionado") motores SI é atenuar a detonação por meio de combustíveis de alto poder antidentalante.

- **Nível de modificação de motor necessária para explorar esse ganho**

A futura tecnologia de motor SI terá uma configuração permite uma alta relação de compressão, um crítico parâmetro para aproveitar todo o potencial dos combustíveis com RON elevado. O sistema de combustão apresentava um cabeçote trapezoidal para acomodar 4 válvulas equipada com sistemas de tempo de válvula variável (VVT) tanto para tubos de admissão quanto para as câmaras de escape. A injeção direta terá injetor piezo permitindo pressões de injeção de até 200 bar. E será equipado com sensor de detonação extremamente sensível [33].

2.3. Levantamento de motores que utilizam combustível de alta octanagem

Elaboração: Petrobras

ROTAS DE DESENVOLVIMENTO

- **Rota de tecnologia dos motores**

Considerando a rota de evolução dos motores, a introdução da tecnologia de injeção direta a gasolina (GDI), com turboalimentação, downsizing (redução do volume em cilindradas do motor) e downspeeding (relação de marchas mais longa para trabalho em rotações mais baixas) é uma rota já disseminada nos EUA (57% para modelos 2020) e Europa (50% para modelos 2017) e que poderá ser adotada em larga escala no Brasil em função da necessidade de atendimentos de metas de eficiência energética.

Considerando como referência um motor de injeção do tipo convencional (PFI – Port Fuel Injection), há potencial de redução de até 15% do CO₂ emitido ao alterar a tecnologia do motor para GDI turbo (JOHNSON) [34], sem necessidade de alterar o combustível. É possível aumentar ainda mais os ganhos de eficiência/redução de CO₂ ao se incluir outras tecnologias nos motores, conforme mostrado na Tabela VI.

Tabela VI. Potencial de redução de CO₂ das tecnologias de motores (JOSHI) [35].

Tecnologia de Motor	Redução de CO ₂
GDI Estequiométrico, Turbo-alimentado	referência
Ciclo Atkinson com Comando de Válvulas Variável (VVT)	3-5%
Start-Stop Avançado	2-5%
Desativação Dinâmica de Cilindros	2-10%
GDI Estratificado	10-20%
Taxa de Compressão Variável	10%
Ignição por Compressão Controlada por Centelha (SpCCI)	20-30%
Injeção de Água	5-10%
Recirculação de Gases da Exaustão Dedicado (EGR)	15-20%
Ignição por Compressão Controlada por Reatividade (RCCI)	20-30%
Pistões Opostos, Dois Tempos	25-35%
Ignição por Compressão com Injeção Direta de Gasolina (GDCI)	15-25%

Quanto à adoção de taxa de compressão variável, SHELBY [36] quantificou o ganho potencial de eficiência dessa tecnologia em um motor GDI turbo com uma gasolina de octanagem RON 91. Os ganhos de eficiência simulados para um veículo com o sistema de dois estágios (taxas de compressão de 10:1 e 13:1) no ciclo combinado (urbano e estrada) foram de 2,5 a 3,1 % em relação à um veículo com taxa fixa de 10:1. Já o sistema de variação contínua (taxas de compressão entre 8:1 e 13:1) levou a um ganho de 2,7 a 3,3 % de eficiência no mesmo ciclo.

Os custos estimados associados à adoção de diferentes tecnologias de motores podem ser vistos na Tabela VII. Pode-se verificar que a implementação do sistema de taxa de compressão variável de dois estágios (*VCR-2 stages*) possui baixo custo de implementação quando comparado com as demais tecnologias de motores e permitiria se trabalhar com dois combustíveis com octanagens diferentes.

Tabela VII. Custos associados à adoção das tecnologias de motores (DE CESARE) [37].

Tecnologia	Motor Base	Variação Média de Custo (Euros)
Injeção Direta mist. pobre	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	385
Ciclo Miller	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil., comando de válvulas variável	200
Taxa de Compressão Variável – 2 estágios	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	125
Taxa de Compressão Variável – contínua	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	350
Injeção indireta de água	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	95
Injeção direta de água (separada)	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	180
Injeção direta de água (misturada)	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	130
Desativação eletrônica de cilindro	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	100
Desativação de cilindro	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil., comando de válvulas variável	200
Recirculação de gases de escape – baixa pressão	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	115
Recirculação de gases de escape – alta pressão	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	115
Turbo - 2 estágios	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	200
Compressor elétrico	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	400
Motor de partida 48V	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	700
Motor de partida 48V+compressor elétrico	Inj. direta, turbo 1 est, 4 cil.	1000

Outra possibilidade para aumento da eficiência dos motores sem necessidade de mudanças na especificação dos combustíveis é a adoção dos ciclos de combustão sobre-expandidos, tal como o ciclo Atkinson. Esse ciclo permite o uso de altas taxas geométricas de compressão (13:1) com combustíveis de octanagem IAD (Índice Anti Detonante [MON+RON]/2) de 87 (ELLIES)[38]. Considerando o uso dos veículos em condição real, os benefícios da utilização de combustíveis de alta octanagem nesses motores são baixos, próximos a zero, não havendo vantagens econômicas para o consumidor [39].

Além da octanagem, outras propriedades dos combustíveis podem influenciar na eficiência térmica dos motores. SZYBIST et al [16], dentro da iniciativa Co-optima do departamento de Energia dos Estados Unidos, apresentam correlações entre seis diferentes propriedades dos combustíveis e a eficiência dos motores. As propriedades são: octanagem RON, sensibilidade ($S = RON - MON$), calor latente de vaporização, velocidade de queima laminar, índice de material particulado e temperatura de ativação do catalisador.

Os efeitos dessas propriedades foram combinados e são apresentados como uma função de mérito (figura 4) capaz de avaliar o potencial de ganho de eficiência a partir das características do combustível. A iniciativa Co-optima tem entre seus objetivos garantir a

segurança energética do mercado de combustíveis americanos, priorizando e valorizando as correntes fósseis disponíveis nas refinarias e os combustíveis renováveis do país.

Figura 4. Função de mérito [16].

$$\text{Merit} = \alpha \cdot f(\text{RON}) + \beta \cdot f(K, S) + \gamma \cdot f(\text{HOV}) \\ + \varepsilon \cdot f(S_L) + \zeta \cdot f(\text{PMI}) + \eta \cdot f(T_{c,90,\text{conv}})$$

Flame Speed PM Emissions Catalyst Light-off
Temp (cold start)

Por fim, entende-se como necessário definir, para a realidade brasileira, quais serão as tecnologias adotadas pelas montadoras de veículos para atendimento às legislações ambientais e de eficiência energética. A partir disso, poderão ser avaliadas as propriedades dos combustíveis requeridas pelos novos motores, priorizando o uso de correntes disponíveis nas refinarias nacionais.

- **Rota de aumento de taxa de compressão via aumento da octanagem dos combustíveis.**

Maiores taxas de compressão nos motores de combustão interna, teoricamente, proporcionam aumento da eficiência térmica. Porém, é preciso se considerar algumas questões tais como: eficiência máxima do motor para uma dada condição, pressão máxima suportada na câmara de combustão e o potencial de aumento de eficiência em função da taxa de compressão. No uso real os veículos não têm o seu funcionamento limitado pela detonação na grande maioria das situações, logo a alta octanagem seria apenas pontualmente demandada durante sua operação [39].

REDMANN [29], avaliou o requisito de octanagem de uma frota de veículos representativos do mercado do Reino Unido. Cabe citar que nenhum dos veículos possuíam recomendações em manual para uso de gasolina com RON superior à 95, (especificação europeia EN228). Para combustíveis de octanagens mais altas que o mínimo de RON 95, verificou-se que pelo menos metade da frota testada foi capaz de gerar um benefício de redução do tempo de aceleração em plena carga dos veículos em dinamômetro de chassi (até 1%). Cerca de 10 a 20% da frota não responderam a nenhuma variação de octanagem. Com base na tabela IV, pode-se observar que o ganho médio com o aumento do RON de 93 para 97 foi de até 1%.

Considerando que estas condições não são representativas do uso médio real dos veículos, o impacto esperado na eficiência é pouco significativo.

Neste programa de teste, nenhum veículo foi projetado especificamente para obter o máximo benefício possível de combustíveis de alta octanagem. Assim, os benefícios encontrados dão uma indicação do potencial que os combustíveis com alto índice de octanas poderiam proporcionar em veículos modernos. Em geral, os veículos são capazes de se beneficiar de combustíveis de alta octanagem avançando o ponto de ignição. Isso aumenta a eficiência do motor, o que resulta em maior torque e melhor economia de combustível. Porém, ressalta-se que essas conclusões são válidas para condições de plena carga, não representativas do uso real.

Segundo ZHOU [39] e JO [40] a alta octanagem do combustível não é necessária na maioria das condições de utilização real do motor. Em trabalho conjunto, a Ford Motors e a Universidade de Melbourne (ZHOU) [39] mostraram que nos ciclos de condução urbano e estrada, representativos do uso real, a limitação de desempenho pela detonação não é significativa. As perdas de eficiência devido às limitações impostas pela detonação foram de 0,3% para o ciclo urbano e de 0,5% para o ciclo estrada.

A Tabela VIII mostra os resultados médios, obtidos por REDMANN [29], comparativos de tempos de aceleração com gasolinas de diferentes octanagens RON para uma frota representativa de veículos do Reino Unido.

Tabela VIII. Redução no tempo de aceleração plena entre 1500 a 4500 rpm [xx].

Tabela VIII. Redução no tempo de aceleração plena entre 1500 a 4500 rpm

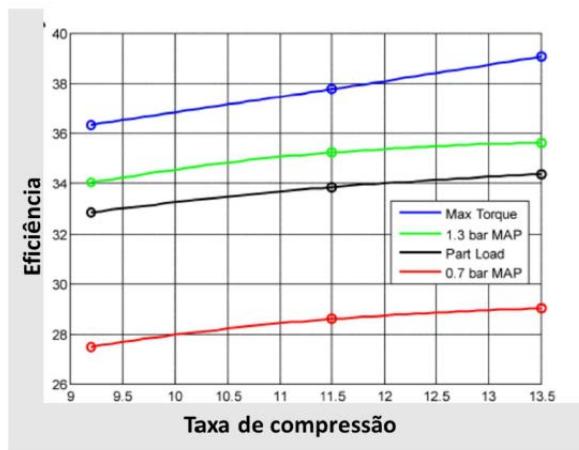
RON	Redução no tempo de aceleração plena (1500 a 4500 rpm) Valores médios da frota testada
91 vs 95	1,76%
91 vs 98	2,07%
93 vs 95	0,61%
93 vs 97	0,92%
95 vs 97	0,40%
95 vs 98	0,44%
95 vs 99	1,12%
95 vs 100	0,52%

Algumas estratégias para redução do consumo de combustível dos motores, tais como turbocompressão, aumento da taxa e downsizing, aumentam a probabilidade de detonação no motor devido a pressões e temperaturas mais altas no cilindro. Um

combustível de alta octanagem minimiza esse fenômeno, porém essa característica do combustível não é necessária na maioria das condições de utilização real do motor.

JO [40] realizou simulações no software GT-Power para avaliar a influência da taxa de compressão na eficiência dos motores sem limitar o desempenho pela ocorrência de detonação. Conforme pode ser visto na Figura 5, para carga parcial, um aumento na taxa de 10,5:1 para 13,5:1, resultou em ganho marginal na eficiência, menor do que 1 ponto percentual. No Brasil, atualmente, a maioria dos motores GDI flex turboalimentados já possuem taxa em torno de 10,5:1 (Stellantis, VW, GM e Renault).

Figura 5. Ganhos de eficiência com aumento da taxa de compressão sem limitar o desempenho pela ocorrência de detonação [10]



Para otimizar o uso de um combustível de alta octanagem, esse pode ser utilizado conforme a demanda do motor, através de um sistema de injeção dupla de combustível, também chamada de *Octane on Demand*, onde o combustível de alta octanagem é injetado apenas quando a detonação está prestes a ocorrer (CHANG) [41].

DULEEP [42] apresenta uma revisão da literatura buscando estabelecer a relação entre eficiência dos motores e a octanagem dos combustíveis. É mostrado que a eficiência pode ser expressa como uma função da taxa de compressão dos motores, mas essa é limitada pela ocorrência de detonação, que pode ser mitigada pelo uso de combustíveis com maior resistência à detonação. Dessa forma, na teoria, pode-se inferir que há uma correlação entre eficiência dos motores e octanagem dos combustíveis. Porém, no mundo real, outros fatores contribuem para a eficiência, tais como tipo do motor, condição operacional, e outras propriedades do combustível.

A revisão apresentada por DULEEP [42] foca na influência do aumento da taxa de compressão na octanagem requerida e na eficiência dos motores, mantendo demais variáveis fixadas. Os resultados apresentados, para motores com taxas de compressão

entre 9 e 13:1 e operando com relação ar-combustível estequiométrica, foram de que o aumento de 1 unidade na taxa de compressão é equivalente a:

- aumento de 4 a 5 unidades no RON; ou
- aumento de 7% a 9% no teor de etanol anidro adicionado (até um máximo de 30%); ou
- conversão de PFI para GDI; ou
- redução do avanço de ignição em 5 a 7 graus.

SPETH [13] quantificou os benefícios econômicos e ambientais considerando a adoção, nos EUA, de veículos leves com menor consumo de combustível. Foram utilizados experimentos e dados de literatura, bem como foram realizadas simulações de veículos em ciclo de condução para estimar a redução de consumo de combustível associada ao uso de gasolina com octanagem elevada (RON 98). As emissões do ciclo de vida de CO₂ e os impactos econômicos para a frota de veículos leves dos EUA foram estimados com base em um modelo de programação linear de refinaria, um modelo de frota calibrada para alta octanagem e uma análise de emissões do poço à roda. Foram encontradas reduções de 3% a 4,4% no consumo de gasolina e de 2,7% a 4,5% nas emissões de CO₂ dos veículos leves.

No entanto, o estudo acima referenciado utiliza uma premissa para estimar a redução de consumo de combustível dos veículos (relação CR/ON, onde CR é a taxa de compressão do motor e ON é a octanagem RON do combustível), retirada de artigos técnicos que exploraram os benefícios do aumento de CR e RON em condições de plena carga do motor (KALGHATGI [44][45], RUSS [46] e OKAMOTO [47]). Tais condições não refletem o uso real e em ciclos de condução, nos quais o desempenho dos motores não está significativamente limitado pela detonação (JO [40], ZHOU [39]), não há demanda por octanagem elevada. Portanto, a eficiência energética dos veículos, base para as previsões de redução de emissões de CO₂ e de benefícios econômicos, deve ser estimada a partir de premissas que representem as condições de uso real e da legislação de homologação dos veículos (ciclos de condução).

SLUDER [48] realizou estudo no qual investigou os benefícios potenciais associados ao uso de uma gasolina E25 de alta octanagem (RON 99) em um motor EcoBoost de 1,6 L, injeção direta e turboalimentado, com um aumento de 1,3 pontos na taxa de compressão, de 10,1:1 para 11,4:1. O mapeamento do motor foi estabelecido para cada par combustível-taxa utilizado no trabalho. A Figura 6, a seguir, apresenta os resultados de consumo energético (kJ/mi) das simulações computacionais para dois veículos completos: um SUV pequeno e um sedã médio. Nota-se que nos ciclos UDDS (ciclo

urbano) e HWFET (ciclo estrada) o aumento da taxa isoladamente (RON 91 / 11,4:1) ou combinado com o aumento de octanagem (RON 99 / 11,4:1) não resultaram em ganhos de eficiência, em kJ/mi. No entanto, para o ciclo US06, que representa condições mais agressivas de direção, o aumento da taxa associado ao aumento de octanagem resultou em ganhos entre 2% e 5%.

Figura 6. Consumo energético (kJ/mi) [48].

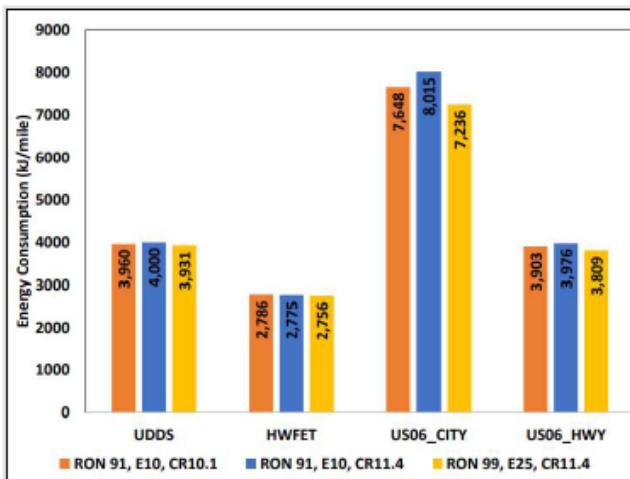


Figure 19. Energy consumption results for the midsize sedan. (CR = compression ratio, HWFET = Highway Fuel Economy Test cycle, HWY = highway, RON = research octane number, and UDDS = Urban Dynamometer Driving Schedule.)

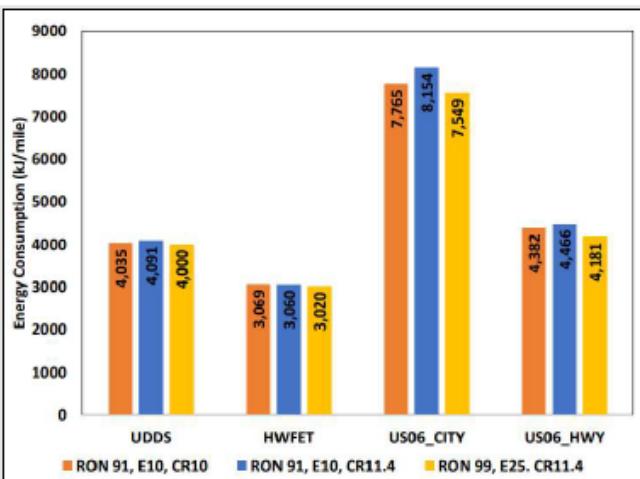


Figure 22. Energy consumption results for the small SUV. (CR = compression ratio, HWFET = Highway Fuel Economy Test cycle, HWY = highway, RON = research octane number, and UDDS = Urban Dynamometer Driving Schedule.)

Em resumo, pode-se observar que o potencial de ganho de eficiência proporcionado pelas maiores taxas de compressão nos motores de combustão interna na frota brasileira deverá ser baixo, considerando que, atualmente, a maioria dos motores GDI flex turboalimentados já possuem taxa em torno de 10,5:1 (Stellantis, VW, GM e Renault). Também vale ressaltar que a maioria dos ganhos observados na literatura com o uso de combustíveis de elevada octanagem se deram em condições de plena carga, que possui baixa representatividade do uso real dos veículos [39].

Além disso, verificou-se que muitos dos estudos de avaliação de eficiência em função do aumento de taxa de compressão foram realizados via simulações computacionais, sem confirmação experimental em protótipos ou veículos comerciais. Isso significa que ainda há muitas etapas de desenvolvimento a serem percorridas até se chegar ao veículo comercial e à especificação do combustível para tal veículo. Resultados de desempenho obtidos via simulação sinalizam o potencial da tecnologia, porém ainda representam níveis de maturidade tecnológica e comercial insipientes. Enquanto as montadoras não possuírem protótipos de veículos que requeiram um combustível não há como se estabelecer a especificação do mesmo.

Os estudos acima apresentados refletem a realidade internacional. Para o caso brasileiro, é necessário considerar as particularidades dos combustíveis (gasolina E27 e etanol H100), além dos veículos, com grande predominância dos de menor cilindrada (veículos 1,0 L) para se avaliar os ganhos de eficiência com a introdução de novas tecnologias de motor em conjunto com o aumento da octanagem e/ou alterações de outras propriedades dos combustíveis. Dessa forma, poderão ser quantificados os ganhos de eficiência no uso real dos veículos, benefícios para o consumidor ao abastecer com o combustível do futuro e para o meio ambiente.

SÍNTESE DAS CONTRIBUIÇÕES RECEBIDAS

A análise bibliográfica realizada conjuntamente pela AEA e UNICA considerou cerca de 30 papers de fontes internacionalmente reconhecidas. Estas referências trazem direcionamentos importantes para atendimento dos objetivos de redução da intensidade de carbono e melhoria da eficiência energética almejados pelo Subgrupo Combustível do Futuro, como por exemplo a faixa do RON de 98 a 102, a adição de biocombustíveis de até E40 e de outros aditivos na gasolina. O alinhamento necessário entre desenvolvimento de motor de maneira concomitante com o novo combustível, além do fato de determinadas tecnologias de motores quando combinadas, poderem potencializar os resultados de consumo e desempenho em determinadas condições de uso.

A análise trazida pela Petrobras considerou um universo igualmente amplo de papers internacionais, e não traz como conclusões para o ganho de eficiência, a adoção de combustíveis de alta octanagem e/ou aumento da taxa de compressão. Ao contrário, indica que os ganhos são pouco significativos e restritos às regiões de alta carga do motor, o que pode ser verificado com os resultados distintos entre os ciclos UDDS (urbano) e US06 (severo) americanos. A adoção de tecnologias como GDI, ciclo Miller ou Atkinson, taxa de compressão variável, entre outros, poderiam trazer ganhos de eficiência significativos sem alteração do combustível.

Ainda de acordo com a Petrobras, seria necessário primeiro definir as metas de eficiência e redução de emissões e as tecnologias do motor a serem utilizadas, e somente em seguida definir a formulação do combustível. Esse processo deveria incluir testes práticos utilizando veículos brasileiros para validar a teoria em estudo.

A AEA entende as duas vertentes de análise, que divergem quanto a um provável ganho de eficiência utilizando combustível de alta octanagem. Um fato incontestável é que a presença maior de biocombustíveis na mescla do combustível do futuro gerará uma redução na intensidade de carbono, considerando o ciclo poço-à-roda. Nesse sentido, é crucial que essas questões sejam analisadas mais a fundo e que sejam encaradas usando veículos e testes com o ciclo de consumo brasileiro, modo de condução típico do usuário local e ciclo de ensaio de homologação. Além disso, é preciso que se busque convergência das tecnologias já em desenvolvimento no mundo e sobretudo para atendimento de outros requisitos como o Proconve L-8 e a nova fase do Rota 2030.

A fim de que se possa caminhar à frente com o estudo, entende-se que será benéfico trabalhar com cenários de metas de eficiência, projetando tecnologias para atendimento em conjunto com a ANFAVEA e SINDIPEÇAS e finalmente gerando as iterações necessárias com cenários de combustíveis diferentes.

Contudo, as conclusões apresentadas até o momento nesse material não são exaustivas, ou seja, não são suficientes para uma recomendação final para determinar a formulação desejada do combustível para a realidade brasileira ou para responder aspectos relacionados à distribuição, refino e impactos econômicos da realidade brasileira.

Por último, e não menos importante, faz-se relevante colocar o cliente em perspectiva, o qual espera receber esse avanço tecnológico como uma melhoria para o país e para o meio ambiente, associado à expectativa de poder extrair maiores valores de autonomia, levando-se em conta a questão primária do equacionamento dos custos de mobilidade.

CAPÍTULO III – PERSPECTIVAS DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA PARA DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO PARA VEÍCULOS LEVES

Elaboração: Anfavea / EPE

As discussões deste capítulo visam apresentar as perspectivas da indústria automotiva para tecnologias de propulsão e composição de frota, para o horizonte de médio e curto prazo. O Brasil está entre os 10 maiores mercados automotivos do mundo, ocupando o 8º lugar em 2019, com venda de 2,7 milhões de unidades de veículos leves. No mercado de veículos pesados ocupa o 4º lugar, comercializando cerca de 115 mil unidades naquele mesmo ano [1].

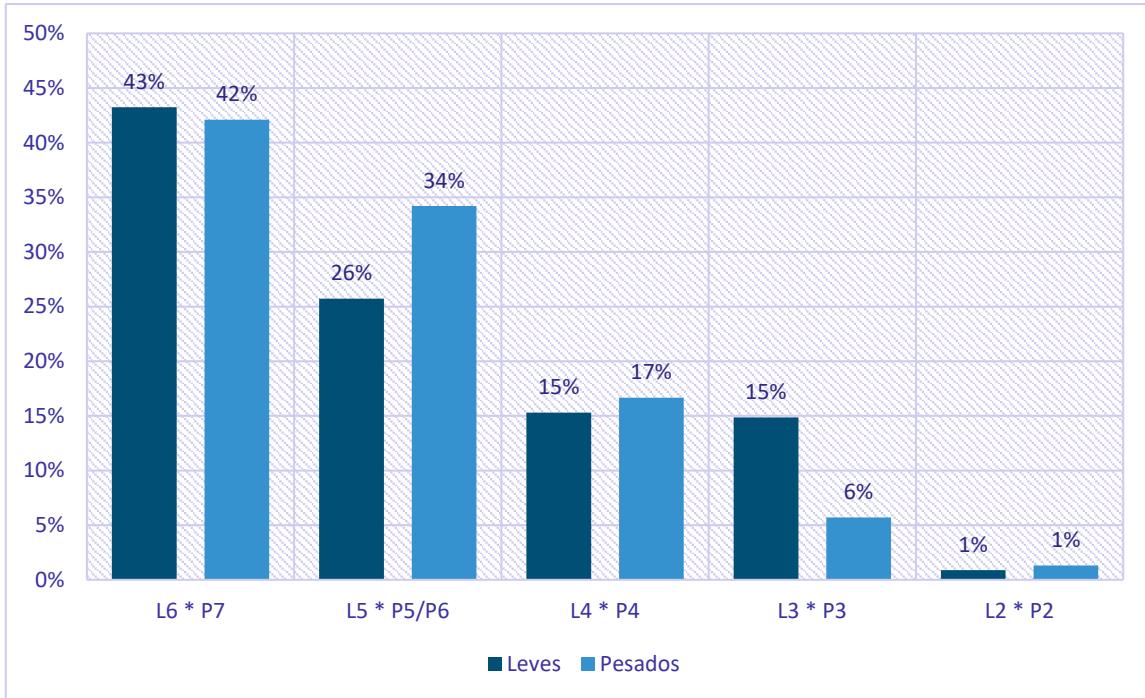
Entre as diversas medidas para fomentar avanços tecnológicos no país podem ser citados os programas Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve) e o Rota 2030.

O Proconve promove a classificação dos veículos conforme os limites de emissões veiculares e possui como objetivo promover avanços tecnológicos de motores e combustíveis, almejando a redução de emissões veiculares de monóxido de carbono, óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, fuligem, material particulado e outros compostos poluentes nos veículos comercializados no país [49]. As fases finais deste programa abrangem as categorias: máquinas agrícolas e rodoviárias (MAR-I), com início em 1º de janeiro de 2015; veículos leves (L8), com início previsto para 1º de janeiro de 2025; e veículos pesados (P8), com início em 1º de janeiro de 2022. As próximas fases do Proconve (P8) promoverão padrões máximos de emissões a partir de 2023. O Proconve P8 é equivalente ao padrão europeu de emissões EURO VI e a fase L8 se espelha na legislação americana US EPA Tier 3 [50].

Por sua vez, o Rota 2030 é um programa de subsídios fiscais para incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento automotivo. Ele substituiu o programa Inovar Auto (que vigorou até dezembro de 2017), utilizando a mesma abordagem estratégica. As empresas devem ser elegíveis para estes incentivos fiscais, e devem concordar com níveis mínimos de investimento [51].

A composição da frota nacional em 2020 foi de aproximadamente 45,1 milhões de veículos leves e 2,3 milhões de veículos pesados, cuja distribuição de acordo com as categorias pode ser observada abaixo [1]:

Figura 7. – Distribuição da frota por categoria – PROCONVE [1].



3.1 Tendência de desenvolvimento da indústria automotiva para novos motores de combustão interna

Para analisar as tendências nos horizontes de médio e curto prazo, a ANFAVEA, juntamente com o BCG (Boston Consulting Group), elaborou um estudo sobre o caminho da descarbonização do setor automotivo, no qual apresentou as perspectivas da frota de veículos quanto às novas tecnologias de propulsão. No estudo, foram considerados dados de 2020, além de previsões para 2030 e para 2035[1].

O estudo apontou três grandes cenários possíveis para o perfil da frota brasileira circulante nos próximos 15 anos. O primeiro seria o “Inercial”, no qual a transformação viria no ritmo atual, sem metas estabelecidas, sem uma organização geral dos setores envolvidos no transporte e na geração de energia, e sem uma política de Estado que incentive a eletrificação. O segundo, batizado de “Convergência Global”, seria o mais acelerado no sentido de acompanhar os movimentos já em curso nos países desenvolvidos. O terceiro é o “Protagonismo de Biocombustíveis”, um caminho que

privilegiaria combustíveis “verdes”, mas com um grau de eletrificação semelhante ao do cenário “Inercial”.

Os vetores que nortearam este estudo foram pautados nas forças locais que influenciam a evolução das rotas nacionais. Destaca-se a regulação e incentivos, o custo total de propriedade (TCO)¹, portfolio e capacidade instalada e os biocombustíveis como alternativa. Atualmente, a regulação veicular não tem vínculo direto com a emissão de CO₂ e demais gases de efeito estufa (GEE), e as políticas neste sentido atuam em múltiplas frentes. A comparação entre o custo de aquisição e uso de veículos, além do perfil de uso e do custo dos combustíveis, são alvo de análise, uma vez que no Brasil o custo do veículo elétrico ainda é muito superior ao de combustão interna, e medidas de subsídio para incentivo à maior inserção desta tecnologia não são visualizadas no curto prazo. O parque fabril nacional possui capacidade instalada de até 4,5 milhões de unidades, superior à sua produção nos últimos anos. Atingiu seu ápice em 2013, quando 3,7 milhões de veículos foram produzidos [52]. Em 2020/2021 foram licenciados cerca de 2 milhões de veículos. Neste sentido, mesmo com ociosidade e foco no segmento compacto de menor valor agregado, são necessários elevados investimentos para produção local de xEVs² [53].

No âmbito do planejamento energético de longo prazo, o Plano Nacional de Energia (PNE 2050) [54] indica que novas tecnologias que mudem o atual sistema de propulsão dos veículos representam transformações industriais e econômicas relevantes no setor de transportes. A propulsão elétrica requer alterações significativas em cadeias industriais, criação e ampliação de nichos de mercado, estratégias corporativas e mudanças legislativas e comportamentais. Os desafios para sua implementação compreendem: identificação de nichos de mercado prioritários para sua promoção, a caracterização de oportunidades e barreiras da cadeia industrial, incluindo o fornecimento de matérias-primas e insumos, a avaliação de impactos da eletrificação veicular na rede elétrica, a maior disseminação de infraestrutura de postos de recarga, aspectos mercadológicos e regulatórios relacionados ao descarte, reuso e reciclagem de baterias elétricas, aspectos econômicos e culturais associados à posse de veículos pelos cidadãos e as condições do mercado automobilístico brasileiro frente ao mercado mundial.

No Cenário Desafio da Expansão do PNE 2050 [54], associado à trajetória de maior eletromobilidade, há uma inequívoca aceleração do licenciamento de veículos leves

¹ TCO - total cost of ownership.

² xEVs: denominação que engloba veículos elétricos como Battery Electric Vehicles (BEVs), Fuel Cell Hybrid Vehicles (FCHVs), Hybrid Vehicles (HEV), Plug in Hybrid Vehicles (PHEV) [53].

elétricos após 2030 e substituição total na venda dos veículos a combustão interna na última década do horizonte de estudo. Este cenário é sustentado por arranjos legais e regulatórios, políticas públicas consistentes e incentivos significativos para a adoção da eletromobilidade, assim como investimentos privados substanciais e redução de custos radicais para viabilizar a massificação do licenciamento de veículos HEV, PHEV e EV.

No que se refere aos biocombustíveis, estes se apresentam com ampla disponibilidade em todo território nacional, usufruindo de infraestrutura de distribuição que alcança todo o país. Ademais, seu uso é fator fundamental para a descarbonização deste segmento, contribuindo para a mitigação da emissão de GEE.

3.2 Perfil da frota brasileira circulante

Segundo estudo elaborado pela ANFAVEA em conjunto com a BCG, os dados da frota circulante de 2020 mostraram que 76% dos veículos eram flex e, 22% eram a gasolina, sendo somente 2% movidos a diesel. No cenário inercial, a previsão para 2030 mostrou aumento no percentual de veículos flex, com 91% da frota total. Os 7% restantes contemplaram veículos movidos a diesel e gasolina, e 2% são de eletrificados. Para 2035, a previsão (em relação a 2030) é de queda no percentual de veículos flex, com 86% de representatividade da frota, seguido de aumento da frota de eletrificados, com 10% da frota. Somente 2% de veículos da frota será do ciclo Diesel e 2% movidos a gasolina[1].

Em seu estudo “Demanda de Energia dos Veículos Leves: 2022-2031” [55], a EPE adota como premissa que, até o final do período, o perfil de vendas de automóveis será majoritariamente a combustão interna e flex fuel. Ressalve-se que a EPE trata os veículos denominados micro-híbridos e mini-híbridos como inovações incrementais dos convencionais, classificando-os, por conseguinte, na categoria de combustão interna [56]. Os veículos flex fuel, que correspondiam a 80% da frota do ciclo Otto (75% da frota total de veículos leves) em 2020, representarão cerca de 89% em 2031. Admite-se que os veículos híbridos (*não plug in*) continuarão ampliando de forma paulatina sua participação no mercado brasileiro, alcançando cerca de 6% dos licenciamentos no final do período. Avalia-se, ainda, que a inserção de híbridos *plug in* e elétricos não terá significância estatística até 2031. Os dados da EPE, apontam valores similares. Considerando os horizontes de médio e longo prazo do escopo deste estudo, a frota total estimada para os anos de 2027 e 2032 está apresentada na Tabela IX, de acordo com os estudos do PDE 2031 [57].

Tabela IX – Perfil da frota brasileira de veículos leves no horizonte a curto (2027) e médio prazo (2032) [57].

Frota veículos leves por tipo/combustível			
milhões de unidades	2020	2027	2032
Gasolina	17,6%	9,7%	6,8%
Etanol hidratado	1,0%	0,4%	0,2%
<i>Flex fuel</i>	75,1%	80,8%	81,7%
Híbrido	0,1%	1,3%	3,0%
Híbrido <i>plug in</i>	0,0%	0,0%	0,0%
Elétrico	0,0%	0,0%	0,0%
Diesel	6,2%	7,8%	8,3%
Total	100%	100%	100%

Ao se considerar os dados do cenário de convergência global , o estudo mostrou que para 2030 a previsão é de que a frota circulante seja composta por 89% de veículos flex, 4% de veículos eletrificados e 7% de gasolina e diesel. Na previsão para 2035 (em relação à 2030), observamos a diminuição de veículos flex para 78% e aumento da frota de eletrificados para 18%, enquanto somente 2% da frota de veículos será a gasolina e 2% de veículos diesel [1].

3.3 Requerimentos de combustíveis para os novos motores

Em relação ao combustível, visto que o Brasil possui, além de um Programa rígido de controle de poluentes (que determinam limites baixos de emissões e de controle de tráfego real, Proconve L7 e L8), metas de eficiência energética, a ANFAVEA recomenda que o combustível no futuro siga os requisitos da categoria 6 do *Worldwide Fuel Charter* [2], documento com reconhecimento internacional, que fornece especificações de combustível para uso com motores projetados para diferentes níveis de controle de emissões e requerimentos da eficiência dos combustíveis. Para o etanol, a proposta da ANFAVEA é a utilização da especificação vigente atualmente. Além disso, propostas de melhorias do combustível podem ser avaliadas.

Cabe pontuar que a produção de uma gasolina premium necessita de uma maior participação de processos com gasto energético superior e, por outro lado, o seu uso pode ser mais eficiente em determinados modelos de veículos (reduzindo o consumo por quilometragem). Contudo, o combustível irá desempenhar de acordo com os limites técnicos dos motores, i.e., características de eficiência pautadas em RON superiores (98 – 102, conforme especificação dos requisitos da categoria 6) podem não apresentar os ganhos de eficiência esperados, dado o perfil e idade da frota nacional. É importante

observar que, atualmente, o uso de gasolina premium impacta apenas uma pequena parcela da frota do ciclo Otto, dada a diversidade de características dos motores dos veículos que compõem a frota nacional. Além disso, possui custo mais elevado, o que tende a dificultar a sua utilização pela população em geral, e a expectativa de melhor desempenho pode não ser observada, em virtude das características do motor.

3.3.1 Tipos necessários de avanços para os motores

Em relação a novas tecnologias para os motores, elencamos os seguintes itens: alternador inteligente, bomba de óleo variável, alternador eficiente, bomba de combustível variável, eletroventilador do radiador variável, comando variável de válvulas, a injeção direta, bomba d'água elétrica, a caixa de câmbio (mecânica ou automática) com multivelocidades ou VVT, Start&Stop, Mild hybrid, direção elétrica, EGR/SCR, sobrealimentação e o Downsizing.

3.3.1.1 Modificações simples e Modificações disruptivas

Ao considerar avanços dos motores, podemos dividir em modificações simples, como a alteração da taxa de compressão, alteração do mapeamento eletrônico (ignição) e óleo lubrificante *low friction*. Além disso, são consideradas modificações disruptivas, como a injeção direta, novos ciclos de combustão, eletrificação parcial (*Mild Hybrid*), *Start&Stop*, assistência de torque elétrico, recuperação de energia na frenagem (KERS) e bateria de 48V.

CAPÍTULO IV - IMPACTO DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO NA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE PETRÓLEO

Elaboração: Petrobras

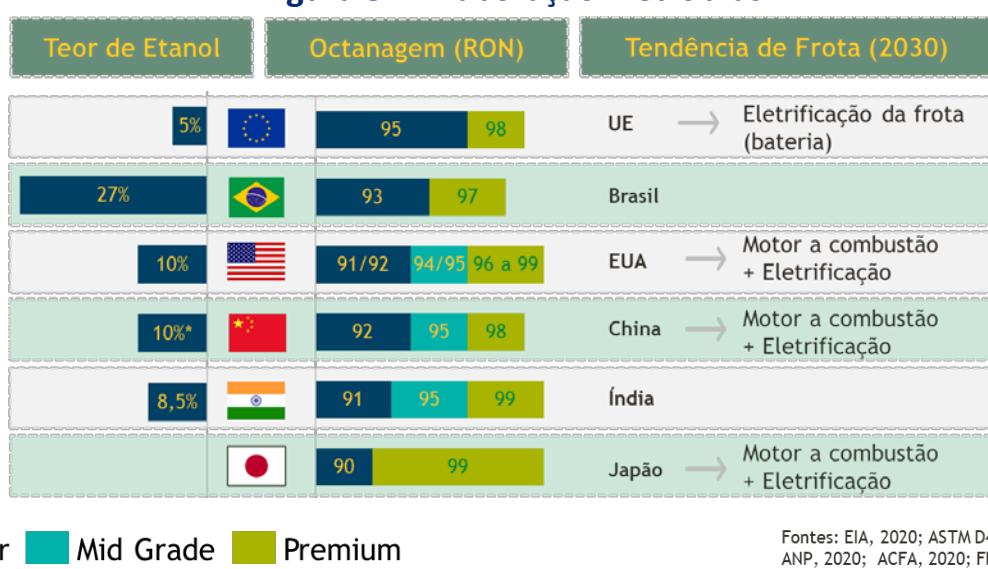
Em função de sua expertise no refino de combustíveis no Brasil, a Petrobras foi convidada a oferecer suas contribuições ao grupo de trabalho sobre o impacto do aprimoramento das especificações do combustível do futuro na produção de combustíveis derivados de petróleo.

Desta forma, procurou-se orientar a avaliação da Petrobras em torno de questões específicas tais como: (a) Análise comparativa das especificações de gasolina A (Europa, EUA, Brasil entre outros mercados relevantes); (b) Avaliação das alternativas para a melhoria da especificação da gasolina; (c) Cenário atual de preço, variação de custo e de preço de paridade de importação, a partir dos principais pontos de melhoria; (d) Potencial de produção (oferta) da gasolina A nas alternativas propostas.

a) Análise comparativa das especificações de gasolina A (Europa, EUA, Brasil entre outros mercados relevantes)

Sobre este aspecto específico, a avaliação indica que **países continentais**, com expressiva produção agrícola, projetam manutenção do motor à combustão associada a aumento de sua eficiência. Além disso, as tendências para Ciclo Otto no Mundo variam de acordo com a matriz energética de cada país.

Figura 8. – Elaboração: Petrobras



Fontes: EIA, 2020; ASTM D4814-21; EEA, 2017; ANP, 2020; ACFA, 2020; FEV Consulting, 2021

b) Avaliação das alternativas para a melhoria da especificação da gasolina

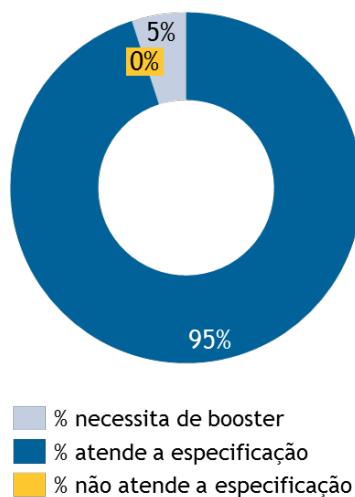
Atualmente, o parque de refino está dimensionado para atender a especificação vigente da gasolina (RON 93 S50). De acordo com a Petrobras, **já existem dificuldades por parte algumas refinarias para atendimento do RON.**

Figura 9. – Elaboração: Petrobras



Figura 10. – (RON 93 S50)

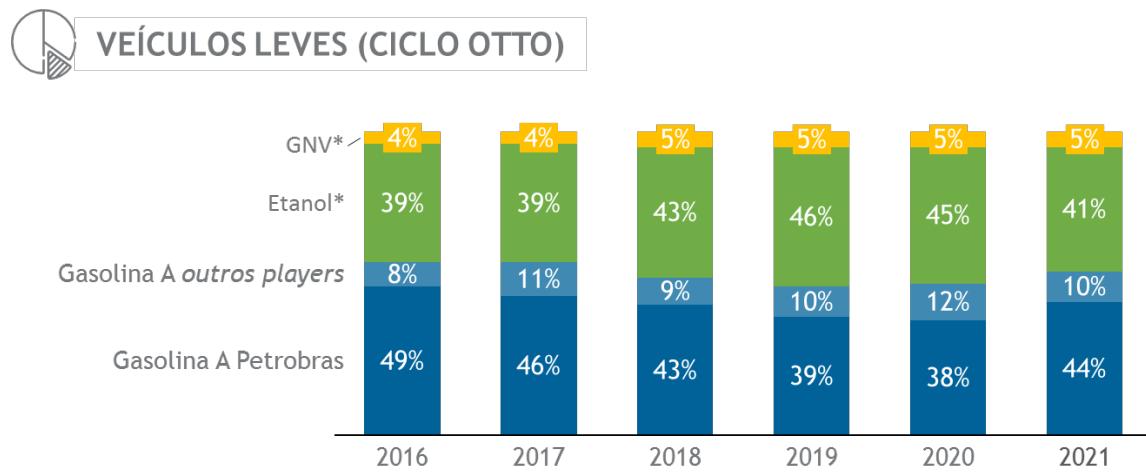
Perfil do atendimento do mercado de gasolina pela Petrobras



Já existe dificuldade de movimentação entre refinarias. Hoje é possível absorver variações no teor de etanol, porém não no limite inferior atualmente permitido pela Lei 8.723/93, que é de 18%.

Cabe destacar que a Petrobras não é a única supridora do mercado e demais players devem adequar seus ativos.

Figura 11. – Suprimento de Combustíveis para o Ciclo-Otto – Elaboração: Petrobras



*Cerca de 80% da frota de automóveis em circulação é flex
Em 2021, a gasolina ganhou participação na escolha do consumidor*

*Etanol Hidratado e GNV considerados em equivalência energética com a Gasolina C
Fonte: ANP

c) Potencial de produção (oferta) da gasolina A nas alternativas propostas.

Hipótese 1: Adequação do parque de refino para RON 95 S50 E27

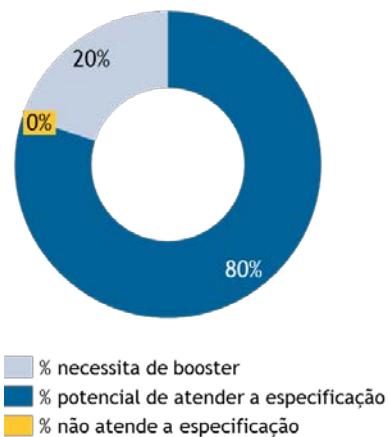
Produção de gasolina com RON fixo, sem flexibilidade para alteração do teor de etanol

Impactos relevantes nesta hipótese:

- Teor de etanol precisa ser fixado
- Parque deixa de ter flexibilidade
- Tempo para ajustes para maior atender a maior movimentação logística entre refinarias
- Booster para gasolina necessário em mais sites para especificação da gasolina

Perspectiva de atendimento do mercado de gasolina pela Petrobras

Figura 12. – (RON 95 S50 E27)
Perfil do atendimento do mercado de gasolina pela Petrobras



Hipótese 2: Adequação do parque de refino para RON 95 S10 E27

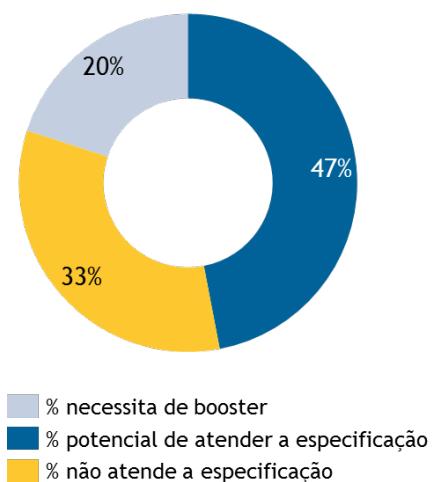
Redução de enxofre reduz a octanagem

Impactos relevantes nesta hipótese:

- Teor de etanol precisa ser fixado: Parque de refino deixa de ter flexibilidade
- Estresse Logístico: País se torna importador estrutural de booster para gasolina
- Investimentos necessários para adequação: Payback maior que 16 anos
- Risco de mudança da matriz energética: Garantia de mercado de longo prazo e precificação são fatores críticos

Perspectiva de atendimento do mercado de gasolina pela Petrobras

Figura 13. – (RON 95 S10 E27)
Perfil do atendimento do mercado de gasolina pela Petrobras



Hipótese 3: Adequação do parque de refino para RON 97 S10 E27

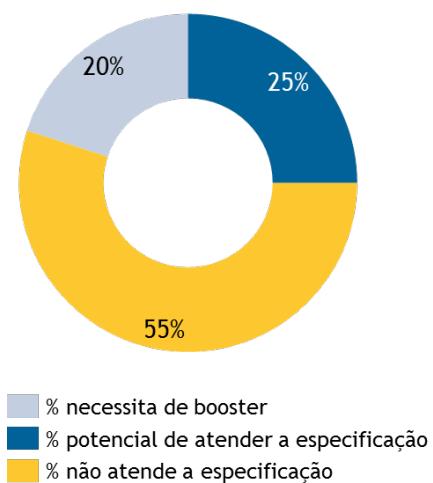
Investimento elevado para adequação da produção: estimado em USD 3 bilhões

Impactos relevantes nesta hipótese:

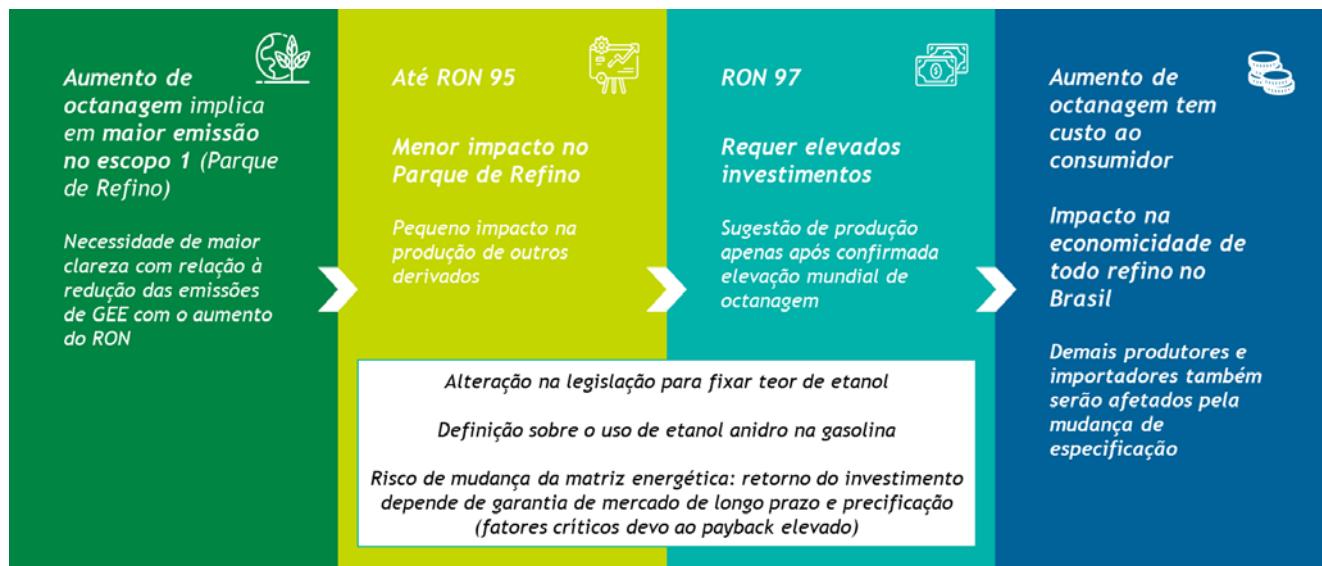
- Teor de etanol precisa ser fixado: Parque deixa de ter flexibilidade
- Impacta Produção de outros derivados: Redução da capacidade instalada para a produção de gasolina
- Estresse Logístico: País se torna importador estrutural de booster para gasolina
- Investimentos necessários para adequação: Necessidade de novas unidades: Reforma, Isomerização, Hidrotratamento. Payback longuíssimo, maior que 20 anos
- Risco de mudança da matriz energética: Garantia de mercado de longo prazo e precificação são fatores críticos

Perspectiva de atendimento do mercado de gasolina pela Petrobras

Figura 14. – (RON 97 S50 E27)
Perfil do atendimento do mercado de gasolina pela Petrobras



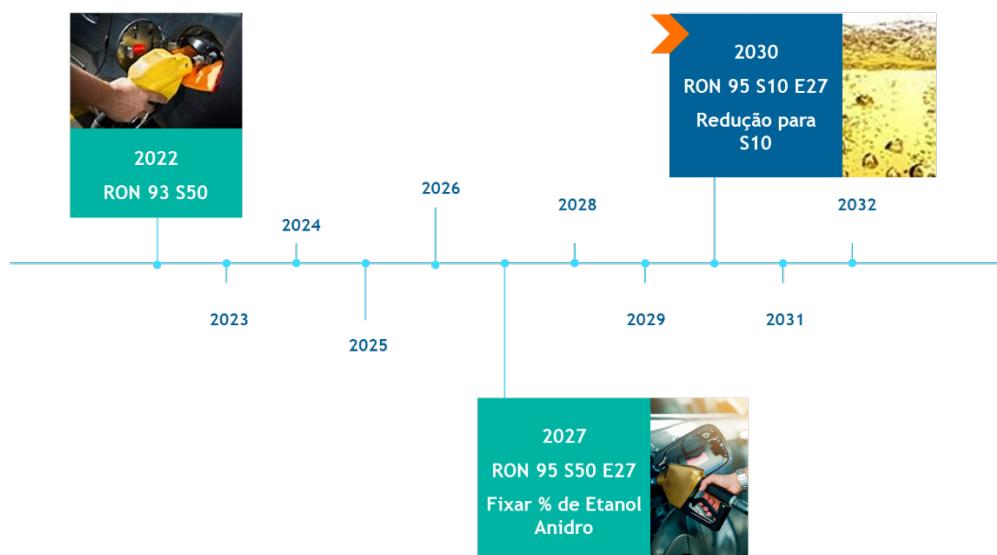
Síntese da avaliação: análise refere-se exclusivamente aos ativos da Petrobras



Em face do apresentado, a Petrobras propõe adoção da especificação RON 95, S50 E27 a partir de 2027 e RON 95, S10 E27, com possibilidade de reavaliação até o final da década para eventual adoção de RON 97 em calendário a ser definido.

Proposta

Octanagem, Enxofre e Teor de etanol anidro



CAPÍTULO V – IMPACTO DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO NA ETAPA DE DISTRIBUIÇÃO

Elaboração: IBP

A busca por maior eficiência é o Norte para a transição energética, que não se restringe produção e consumo dos combustíveis, mas perpassa a redução das emissões de gases e efeito estufa e poluentes locais em toda a cadeia logística. A adoção de arranjos mais eficientes e a racionalização dos processos operacionais ganham ainda mais relevância para a descarbonização da matriz de transportes em um país com dimensões continentais como o Brasil.

Os desafios tornam-se ainda maiores ao considerarmos o atual nível de eficiência da distribuição de combustíveis. O planejamento contínuo de investimentos em infraestrutura, o desenvolvimento de ferramentas para roteirização inteligente, a programação de entregas, e a implementação das melhores práticas operacionais são realidade no setor. As melhorias em processos otimizados são mais difíceis.

Neste contexto, qualquer mudança deve ser bem planejada visando ao menor impacto possível à sociedade e potencializando o custo-benefício. O aproveitamento da infraestrutura existente é fundamental e as alterações no portfólio de produtos deve ser avaliada de forma integrada, não somente no segmento da distribuição de combustíveis, mas em toda a cadeia.

Gasolina de maior octanagem

A melhoria na eficiência do produto que deve resultar em menor consumo e menor emissão de poluentes exigirá investimento nas refinarias para que consigam aprimorar os componentes químicos do produto. Aos consumidores a entrada desta gasolina deverá respeitar o cronograma das refinarias.

A logística que inicia no produtor e termina no tanque do equipamento dos consumidores é longa e exige infraestrutura robusta para que o produto chegue ao destino na qualidade adequada e custos otimizados. Na maior parte do país, a gasolina sai das refinarias por dutos conectados às bases de distribuição. Nestas bases o produto é misturado com o etanol anidro para então ser transportado aos postos de combustíveis por caminhões tanque. Em algumas localidades a gasolina sai de bases maiores para bases menores, transportada por ferrovia para então ser carregada aos postos revendedores.

Os postos de combustíveis também têm infraestrutura dedicada a cada produto para que a qualidade deste seja assegurada.

Ao respeitarmos o cronograma de adequação das refinarias para disponibilização do novo produto, esta infraestrutura hoje utilizada para Gasolina A será automaticamente utilizada para o novo produto, sem impactos na infraestrutura de bases, frota de caminhões e postos de combustíveis, garantindo à sociedade a oferta do produto mais eficiente sem aumento de custos logísticos.

Importante ainda destacar que o produto movimentado por navios, importação e cabotagem, seguirá esta mesma lógica de aproveitamento da infraestrutura existente substituindo o produto atual pelo produto mais eficiente.

Etanol de padrão internacional

Eventual adoção de etanol com especificação única traria melhorias significativas com redução de custos no sistema logístico. Além disso, alinhado com o mercado internacional, traz ganhos importantes com a otimização de infraestrutura existente, hoje duplicada pela presença de duas especificações do etanol, anidro e hidratado.

A logística do etanol é, predominantemente, rodoviária. Dos produtores, este é transportado por grandes caminhões e levado às bases de distribuição. Nas bases, o etanol anidro é armazenado para depois ser misturado com a Gasolina A. O etanol hidratado também é armazenado, em tanques específicos, e depois carregado em caminhões menores respeitando a infraestrutura dos postos de combustíveis.

A unificação do produto favorece também o abastecimento. Com logística única aumenta a segurança do suprimento e reduz os custos de estoque.

O ganho de eficiência no transporte, na armazenagem e no uso da infraestrutura será aproveitado pelo consumidor com preços mais acessíveis do produto.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO - PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

- a) Nova especificação dos combustíveis de alta octanagem e baixa intensidade de carbono para o Ciclo-Otto

A Resolução ANP Nº 864, de 23 de dezembro de 2021, estabelece as especificações dos combustíveis de referência a serem utilizados nos ensaios de avaliação de consumo de combustível e de emissões veiculares para a homologação de veículos automotores novos e de máquinas agrícolas e rodoviárias novas.

De acordo com o disposto no Art. 2º, inciso IV, da referida resolução, a gasolina de referência E22, a ser utilizadas nos testes de homologação a partir das fases Proconve L-8, para veículos leves com motor de ignição por centelha e Promot M-5, deve atender à especificação constante na Tabela 4 do Anexo da citada resolução, conforme Tabela X a seguir:

Tabela X – Especificação E22 – RANP 864/2021

Característica	Unidade	Limites		Métodos
		Gasolina E0	Gasolina E22	
Aspecto	-	-	-1	NBR 14954; ASTM D4176
Massa específica a 20ºoC	kg/m³	720,0 a 758,0	735,0 a 765,0	NBR 7148; NBR 14065; ASTM D1298; ASTM D4052; ISO 3675; ISO 12185
Destilação	Ponto inicial de ebulação (PIE)	oC	30,0 a 40,0	NBR 9619; ASTM D86
	10% evaporados (T10%)	?oC	45,0 a 60,0	
	50% evaporados (T50%)	?oC	90,0 a 110,0	
	90% evaporados (T90%)	?oC	149,0 a 170,0	
	Ponto final de ebulação (PFE)	?oC	195,0 a 213,0	
	Resíduo, máx	% volume	2	
Número de Octano	RON, mín	-	-	ASTM D2699
	MON, mín	-	-	ASTM D2700
Pressão de vapor a 37,8ºoC	kPa	-	54,0 a 64,0	NBR 14149; NBR 14156; ASTM D4953; ASTM D5190; ASTM D5191; ASTM D5482
Goma atual lavada, máx	mg/100 mL	-	4	NBR 14525; ASTM D381
Período de indução a 100ºoC, mín	minutos	-	1.000	NBR 14478; ASTM D525
Corrosividade ao cobre à 3h e 50ºoC, máx	-	-	1	NBR 14359; ASTM D130; ISO 2160
Teor de enxofre, máx (5)	mg/kg	-	10	ASTM D5453 (6); ASTM D2622; ASTM D3120; ASTM D7039
Teor de benzeno, máx	% volume	-	-	1
Hidrocarbonetos	Aromáticos, máx (8)	% volume	35	NBR 14932; ASTM D1319
	Olefínicos, máx (8)	% volume	15	
	Saturados (8)	% volume	Anotar	
Contaminantes	Chumbo, máx (9)	g/L	0,005	ASTM D3237
	Fósforo, máx (9)	g/L	0,005	ASTM D3231
Teor de EAR (10)	% volume	isento	21 a 23	NBR 13992
Teor de Metanol, máx	% volume	-	0,5	NBR 16041; NBR 16943 (3)

Dentre as características especificadas na Tabela 2, cabe destacar o limite máximo estabelecido para o teor de enxofre. De acordo com a nova regra, o teor de enxofre máximo permitido no combustível de referência, para homologação de veículos L8, é de

10 mg/kg (ppm), em substituição ao teor de 50 mg/kg admitidos para a fase L7 [59]. Tal redução foi motivada pelo fato de que o enxofre presente no combustível causa um grande impacto nos níveis de emissões dos veículos, independente das tecnologias adotadas. Tal efeito acontece porque o enxofre tende a se acumular na superfície dos catalisadores dos sistemas de pós-tratamento causando o envenenamento dos sítios ativos desses catalisadores, reduzindo a sua eficiência e vida útil e acarretando aumento das emissões de NOx.

Faz-se importante destacar que, ainda que o limite de 10 ppm de enxofre definido na Resolução 864 se refira ao combustível de referência, a ser empregado nos testes de homologação, a durabilidade das emissões deve ser atendida utilizando-se o combustível de uso rodoviário. Nesse sentido, é de fundamental importância que, quando da entrada em vigor da nova fase do Proconve L8, em 1º de janeiro de 2025, o combustível de uso rodoviário esteja mais próximo possível do combustível de referência utilizado na homologação dos veículos, no que tange ao teor de enxofre, a fim de permitir o cumprimento dos limites de emissões estabelecidos pela regulamentação vigente.

Diante desse cenário, desde 2018, quando da publicação da Resolução CONAMA nº 492, e a perspectiva de entrada da fase L8, a ANP já iniciou um trabalho visando a redução do teor de enxofre na gasolina de uso automotivo a ser comercializada em todo território nacional. Nesse sentido, a ANP vem conduzindo uma série de discussões, com a participação tanto dos produtores de combustíveis quanto do setor automotivo e órgão ambientais, a fim de definir a melhor estratégia para o atingimento das metas de redução de emissões.

b) Cronograma de implementação do Combustível do Futuro

A partir dos elementos apresentados neste relatório, conclui-se que a recomendação para a especificação do combustível do futuro, no que se refere à gasolina comercializada no País, tem como cronograma:

- **Aprimoramento da especificação da gasolina C para atender a RON 95 S10 E27 a partir de 2027; e**
- **Aprimoramento da especificação da gasolina C para atender a RON 97 S10 E27 a partir de 2032, com possibilidade de antecipação para 2030.**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANFAVEA, BCG, 2021 *O Caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil*. Acesso em 23 mar. 2022. Disponível em https://anfavea.com.br/docs/APRESENTA%C3%87%C3%83O_ANFAVEA_E_BCG.pdf
- [2] WWFC ACEA. Worldwide Fuel Charter. 6ª edição. Outubro de 2019.
- [3] JEC. JEC Tank-To-Wheels report v5: Passenger cars, 2020.
- [4] MCCORMICK, Robert L; ZIGLER, Bradley T, *Fuels to Enable More Efficient Engines*, p. 17.
- [5] Szybist, J.P., et al. - 2021 - *What fuel properties enable higher thermal efficiency in spark-ignite engines?* Progress in Energy and Combustion Science, v. 82, p. 100876, 2021.
- [6] LEONE, Thomas G. et al, *Effects of Fuel Octane Rating and Ethanol Content on Knock, Fuel Economy, and CO₂ for a Turbocharged DI Engine*, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, v. 7, n. 1, p. 9–28, 2014.
- [7] JUNG, Hosuk H. et al, *Fuel Economy and CO₂ Emissions of Ethanol-Gasoline Blends in a Turbocharged DI Engine*, SAE International Journal of Engines, v. 6, n. 1, p. 422–434, 2013.
- [8] GASPAR, Daniel; WAGNER, Robert, *Co-Optimization of Fuels & Engines: Past, Present, and Future - What did we learn and where do we go next?*, p. 45, p. 202.
- [9] SZYBIST, Jim; WEST, Brian, *Update on Co-Optima Light-Duty Spark-Ignition Research*, p. 12.
- [10] Anderson et al., *High octane number ethanol-gasoline blends Quanti*, 2012.
- [11] beto-co-optima-capstone-report-mar-2020.pdf.
- [12] The Role of High-Octane Fuels in Future Mobility.pdf.
- [13] Octane Requirements and Efficiency in a Fleet of Modern Vehicles.pdf.
- [14] High Octane Petrol Study.pdf.
- [15] Fuel Blendstocks with the Potential to Optimize Future Gasoline Engine Performance Co-optima.
- [16] SZYBIST, James P. et al, *What fuel properties enable higher thermal efficiency in spark-ignited engines?* Progress in Energy and Combustion Science, v. 82, p. 100876, 2021.
- [17] beto-co-optima-fy20-yir-report.pdf.
- [18] beto-co-optima-fy19-yir-report-june-2020.pdf.
- [19] Co-Optima_YIR2018_FINAL_LOWRES 190619_0.pdf.
- [20] Top Ten Blendstocks for Turbocharged.pdf.
- [21] E30 CRC-Project-AVFL-26-Final-Report_Aug2020).
- [22] HOF-Project-Summary_2016_07_31-Final.pdf.
- [23] 2015_Sandia_-_Miles_-Apprd.pdf.
- [24] SCHILL, Susanne Retka, ASTM calls new 100 octane fuel spec groundbreaking, p. 1, .
- [25] 04-C.Jones_FSSAT Updating_D8076_100_RON_Test_Fuel_Progress_Report.pdf.

-
- [26] D02 Committee - *Specification for 100 Research Octane Number Test*.pdf, p. 8.
- [27] SZYBIST; WEST, Update on Co-Optima Light-Duty Spark-Ignition Research.
- [28] Effect-of-Fuel-Octane-on-the-Performance-of-Four-Euro-5-and-Euro-6-Gasoline-Passenger-Cars. Concawe Report nº 7/19.
- [29] REDMANN, Jan-Hendrik et al, *Octane Requirement and Efficiency in a Fleet of Modern Vehicles*, in: SAE Technical Paper, 2017, p. 2017-01-0810.
- [30] Thomas et al. - 2015 - Effects of High-Octane Ethanol Blends on Four Lega.pdf.
- [31] beto-co-optima-capstone-report-mar-2020.pdf.
- [32] Insights into Future Mobility: Executive Summary.
- [33] The Role of High-Octane Fuels in Future Mobility.pdf.
- [34] JOHNSON, Timothy V. *Review of vehicular emissions trends*. SAE International Journal of Engines, v. 8, n. 3, p. 1152-1167, 2015. (SAE 2015-01-0993)
- [35] JOSHI, Ameya. *Review of vehicle engine efficiency and emissions*. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, v. 1, n. 2019-01-0314, p. 734-761, 2019. (SAE 2019-01-0314)
- [36] SHELBY, Michael H. et al. *Fuel economy potential of variable compression ratio for light duty vehicles*. SAE International Journal of Engines, v. 10, n. 3, p.817-831, 2017. (SAE 2017-01-0639)
- [37] DE CESARE, Matteo; CAVINA, Nicolo; PIANO, Luigi. *Technology comparison for spark ignition engines of new generation*. SAE International Journal of Engines, v. 10, n. 5, p. 2513-2534, 2017. (SAE 2017-24-0151)
- [38] ELLIES, Benjamin; SCHENK, Charles; DEKRAKER, Paul. *Benchmarking and Hardware-in-the-Loop Operation of a 2014 MAZDA SkyActiv 2.0 L 13:1 Compression Ratio Engine*. SAE Technical Paper, 2016. (SAE 2015-01-1007).
- [39] ZHOU, Zhenbiao et al. *The significance of octane numbers to drive cycle fuel efficiency*. Fuel, v. 302, p. 121095, 2021.
- [40] JO, Young Suk et al. *Performance maps of turbocharged SI engines with gasoline-ethanol blends: torque, efficiency, compression ratio, knock limits, and octane*. SAE Technical Paper, 2014. (SAE 2014-01-1206)
- [41] CHANG, Junseok et al. *Octane-on-demand as an enabler for highly efficient spark ignition engines and greenhouse gas emissions improvement*. SAE Technical Paper, 2015. (SAE 2015-01-1264)
- [42] DULEEP, K., "The Benefits of Increasing Fuel Octane Number on Gasoline Engine Efficiency: A Literature Review" SAE Technical Paper 2017-01-2237, 2017, doi:10.4271/2017-01-2237.
- [43] SPETH, R. L., "Economic and Environmental Benefits of Higher-Octane Gasoline", Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 6561–6568

- [44] KALGHATGI, G. "Fuel Anti-Knock Quality Part I. Engine Studies", SAE Technical Paper 2001-01-3584, 2001.
- [45] KALGHATGI, G. T.; NAKATA, K.; MOGI, K. "Octane Appetite Studies in Direct Injection Spark Ignition (DISI) Engines", SAE Technical Paper 2005-01-0244, 2005.
- [46] RUSS, S. "A Review of the Effect of Engine Operating Conditions on Borderline Knock", SAE Technical Paper 960497, 1996.
- [47] OKAMOTO, K.; ICHIKAWA, T.; SAITO, K.; OYAMA, K.; HIRAYA, K.; URUSHIHARA, T. "Study of Antiknock Performance Under Various Octane Numbers and Compression Ratios in a DISI Engine", SAE Technical Paper 2003-01-1804, 2003.
- [48] SLUDER, C. S.; SMITH, D. E.; WEST, B. H. "An Engine and Modeling Study on Potential Fuel Efficiency Benefits of a High-Octane E25 Gasoline Blend", Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2017/357, 2017.
- [49] IBAMA, 1986 PROCONVE – Programa de controle de emissões veiculares. Acesso em 01 abr. 2022. Disponível em <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>
- [50] BRASIL, 2018 Resolução Nº 490, de 16 de Novembro de 2018. Proconve P8. Acesso em 24 mar. 2022. Disponível em https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TzC2Mb/content/id/51058898/do1-2018-11-21-resolucao-n-490-de-16-de-novembro-de-2018-51058604.
- [51] ME, 2020 Rota 2030 – Mobilidade e Logística. Ministério da Economia, Brasília. Acesso em 01 abr. 2022. Disponível em <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>
- [52] ANFAVEA, 2022 Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2022. Disponível em <https://anfavea.com.br/anuario2022/2022.pdf>. Acesso em 01 abr. 2022.
- [53] METI, 2020 Japan Promotes Electrified Vehicle (xEV) Strategy ahead of 2050. Ministry of Economy, Trade and Industry. Acesso em 08 abr. 2022. Disponível em [https://www.meti.go.jp/english/mobile/2018/20180911001en.html#:~:text=These%20electrified%20vehicles%20\(xEVs\)%20includes,performance%20across%20the%20automotive%20sector](https://www.meti.go.jp/english/mobile/2018/20180911001en.html#:~:text=These%20electrified%20vehicles%20(xEVs)%20includes,performance%20across%20the%20automotive%20sector).
- [54] EPE, 2020 Plano Nacional de Energia – PNE 2050 Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Acesso em 25 mar. 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>
- [55] EPE, 2021 Demanda de Energia dos Veículos Leves: 2022-2031. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Acesso em 25 mar. 2022. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-607/Demanda_Ve%C3%ADculos_Ledes_2022_2031.pdf#search=leves
- [56] MACHADO, G. V.; COSTA, A. O.; STELLING, P. F. B.. A Estrada à Frente: Oportunidades e Desafios para a Eletromobilidade no Brasil. Apresentado em Rio Oil & Gas Expo & Conference 2018, Rio de Janeiro, 2018: Organização IBP (IBP1714_18).

[57] EPE, 2022 *Plano Nacional de Expansão de Energia – PDE 2031*. Acesso em 01 abr. 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>

[58] Resolução ANP nº 864, de 23 de dezembro de 2021.

[59] Resolução ANP nº 764, de 20 de dezembro de 2018.

[60] Resolução CONAMA nº 492, de 20 de dezembro de 2018.