

Avaliação dos requisitos de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento combinados para veículos leves na fase L7 do PROCONVE

Custo-efetividade e custo/benefício

Julho 2020

Avaliação dos requisitos de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento combinados para veículos leves na fase L7 do PROCONVE

Custo-efetividade e custo/benefício

Sumário Executivo:

O PROCONVE L7 inclui novos requisitos de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento para automóveis e comerciais leves a álcool, gasolina e flex fuel, com base nos procedimentos de teste da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (Environmental Protection Agency - EPA). Os novos requisitos de controle avançado de emissões evaporativas deverão ser implantados a partir de janeiro de 2022 e os requisitos de controle do reabastecimento (baseados na tecnologia ORVR) serão implantados progressivamente, iniciando com 20% em 2023 e atingindo 100% em 2025, conforme proposto pela indústria durante as discussões no CONAMA. Este documento é uma avaliação da nova regulamentação de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento, desenvolvido para avaliar a relação custo-efetividade e o custo/benefício dessas tecnologias, abordando os efeitos do ozônio fotoquímico produzido a partir dos Compostos Orgânicos Voláteis (COVs^a), como os vapores de gasolina e de etanol, na saúde, no bem-estar e na economia. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP^b) foi tomada como exemplo de bacia aérea urbana para avaliar o impacto do ozônio na qualidade do ar, porque é a região que possui o sistema de monitoramento mais abrangente a nível nacional e o maior número de estudos científicos disponíveis. Além disso, a RMSP concentra 21 milhões de habitantes e mais de 15% de todos os veículos leves no Brasil. Tal concentração de população e frota por si já justifica a implementação de tecnologias avançadas de controle de emissões evaporativas e ORVR, como um grande passo, necessário para atender aos padrões de qualidade do ar para ozônio atuais e futuros no Brasil. Além disso ela também representa bem outras regiões urbanas, onde mais de 50% da frota nacional de veículos leves está concentrada.

Este documento aborda o efeito conjunto dos requisitos de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento do PROCONVE L7, combinando dois estudos anteriores voltados a cada tecnologia isoladamente. O primeiro trata dos aprimoramentos feitos sobre a fase PROCONVE L6 para o controle avançado de emissões evaporativas, enquanto que o segundo trata dos benefícios adicionais da introdução do controle de emissões de reabastecimento na fase PROCONVE L7.

Os pontos-chave estão resumidos a seguir:

^a Os termos Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) e hidrocarbonetos são usados alternativamente na literatura técnica sobre o assunto.

^b A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é composta por 39 municípios vizinhos, incluindo a capital paulista.

- Os COVs provenientes das emissões evaporativas e de reabastecimento contribuem significativamente para a formação de ozônio fotoquímico. Dos 20 COVs identificados como principais agentes na formação de ozônio, 10 em média podem ser encontrados no vapor de gasolina emitido durante o reabastecimento.
- Os veículos leves integrarão seus controles de evaporação e reabastecimento (ORVR) em um pacote de tecnologia que compartilha parte do hardware, a mesma instalação no veículo e a calibração do motor. Esse pacote tecnológico integrado permite que o sistema de controle atenda a vários propósitos, o que torna o sistema ainda mais eficiente e econômico. Isso reduz os custos de engenharia, ferramental, componentes e montagem.
- A tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas captura 80% das emissões evaporativas de resfriamento, diurnas e de permeação, não capturadas pelos requisitos de controle estabelecidos na fase PROCONVE L6.
- A tecnologia ORVR captura 98% das emissões de reabastecimento e outros 45% das emissões durante o movimento do veículo (*running losses emissions*), ainda não cobertas pela tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas utilizada para atendimento aos requisitos da fase L7 do PROCONVE.
- Uma vez que os testes de emissão evaporativa e de reabastecimento compartilham muitos dos métodos e das instalações de teste, a medição de emissão durante o reabastecimento não aumenta significativamente os requisitos gerais de equipamentos de laboratório, instrumentação ou demais instalações de teste. Além disso, o requisito de certificação de reabastecimento se encaixa bem no atual protocolo de certificação de emissões usado pela CETESB e, portanto, não requer maiores demandas do governo na execução do Programa.
- O controle avançado de emissões evaporativas exigido pelo PROCONVE L7 moderniza o setor automotivo brasileiro e alinha os requisitos de tecnologia com os dos EUA, Canadá, Europa e China, que concentram mais de 70% do mercado automotivo global. No caso do reabastecimento, o PROCONVE L7 está alinhado com os EUA, Canadá e China, que concentram quase 60% do mercado automotivo global. Os padrões aprimorados de emissões evaporativas e de reabastecimento trarão tecnologia para o Brasil, tornando os fornecedores e fabricantes brasileiros mais competitivos no mercado mundial.
- A tecnologia de controle avançado de emissão evaporativas adicionará US\$ 22 ao custo de um veículo novo de tecnologia PROCONVE L6. Para o controle de emissões de reabastecimento por meio da tecnologia ORVR, o custo adicional ao anterior será de US\$ 23, totalizando US\$ 45.
- O valor do vapor de combustível capturado e reaproveitado pela tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas e pelo ORVR em um veículo leve durante sua vida útil é 2,6 vezes maior que o custo de instalação do novo hardware (US\$ 118 / US\$ 45). O valor de custo-efetividade é, na verdade, uma economia de US\$ 750 por tonelada de COV evitada, que representa uma redução de custo para o consumidor.
- O uso das tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e ORVR pode reduzir a emissão total de COVs no inventário da RMSP em cerca de 49%.
- Tais reduções de COV podem diminuir a concentração média de ozônio na RMSP em cerca de 50% (equivalente a 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) na estação do ano mais crítica e levar os valores regionais de pico para a faixa de 61 a 91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aumentando significativamente a conformidade com o padrão de qualidade do ar para ozônio (140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RMSP, e

são essenciais para atendimento aos padrões intermediários proposto pela OMS, de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A longo prazo, estas mesmas tecnologias aumentarão bastante as possibilidades de atendimento às metas de ozônio propostas pela OMS (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

- Essas reduções de ozônio correspondem à redução de 112 internações hospitalares relacionadas a problemas respiratórios e de 296 mortes prematuras anualmente na SPMA. Este benefício social é de pelo menos US\$ 429 milhões ao ano em economia do setor de saúde e no valor das mortes prematuras evitadas.
- Adicionalmente, os benefícios anuais ao bem-estar e à redução de prejuízos materiais devidos às reduções de ozônio na RMSP são de cerca de US\$ 15,6 milhões. Isso abrange danos às culturas agrícolas e materiais, bem como efeitos aos ecossistemas. Além disso, as emissões anuais de CO_2 deverão ser reduzidas em 69.000 toneladas na RMSP.
- Existe um risco elevado de câncer relacionado à exposição ao benzeno para os atendentes dos postos de gasolina. Hoje, o risco é de cerca de 1,33 casos por ano para os cerca de 332.000 atendentes de postos de gasolina no Brasil. Esse risco, quatro em um milhão, é quatro vezes o considerado aceitável pelos profissionais da área de saúde pública. Com uma eficiência de controle de 98%, o ORVR deverá reduzir as incidências anuais para 0,03 casos por ano ou um risco de 0,08 em um milhão.
- A redução das emissões de reabastecimento e durante o movimento do veículo (*running losses emissions*) levará à diminuição proporcional da emissão de aromáticos para a atmosfera, os quais são precursores conhecidos que contribuem para a criação de aerossóis orgânicos secundários, resultando em uma significativa redução de material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$).
- O vapor de combustível capturado e reaproveitado no veículo pelo controle avançado de emissão evaporativas e pela tecnologia ORVR reduz o uso anual de gasolina em 14.100 m^3 e o uso de etanol em 24.500 m^3 na RMSP e 84.100 m^3 de gasolina e 96.000 m^3 de etanol em todo o Brasil.
- De maneira geral, a análise custo/benefício indica as seguintes economias para a RMSP:

• Categoria de custo/benefício	Milhões de dólares
Custo do equipamento embarcado na frota	\$12
Economia de combustível	-\$46,6
Economias em saúde*	-\$429 (VSL)
Redução de prejuízos materiais	-\$15,6

* Com base no valor estatístico da vida (VSL) para mortes prematuras evitadas

Do ponto de vista da sociedade, cada dólar gasto no controle de emissões evaporativas retorna US\$ 37 em saúde, bem estar e economias materiais para a sociedade (relação benefício/custo de 37:1).

Índice:

Sumário Executivo	2
Introdução	6
A. Vapor de gasolina e reatividade para formação de ozônio	6
B. Experiência sobre emissões evaporativas e as novas tecnologias de controle	9
1. <u>Controle das emissões evaporativas e de reabastecimento no PROCONVE</u>	9
2. <u>Por que a Europa ainda não adotou o ORVR</u>	12
C. Custo-efetividade das tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento no Brasil	14
1. <u>Tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas</u>	14
2. <u>Tecnologia de controle das emissões de reabastecimento (ORVR)</u>	15
3. <u>Tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e controle de reabastecimento combinadas</u>	17
D. Custo/benefício das tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento no Brasil	17
1. <u>Custos de controle na frota de 2018 equipada com controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento em todos os veículos.</u>	19
2. <u>Informações sobre o inventário de COVs precursores de ozônio na RMSP em 2018</u>	20
3. <u>Informações sobre a qualidade do ar por ozônio para a RMSP para 2018</u>	21
4. <u>Como um novo regulamento alteraria o inventário e a qualidade do ar por ozônio</u>	23
5. <u>Impacto econômico sobre a saúde, bem-estar e prejuízos físicos resultantes da redução do ozônio na atmosfera</u>	24
6. <u>Quantificação do valor monetário desses benefícios positivos</u>	26
E. Saúde ocupacional – postos de gasolina	28
F. Co-benefícios na redução da formação de aerossóis orgânicos secundários e MP _{2,5}	28
Conclusões	29
Referências bibliográficas	30

Introdução

O Brasil utiliza dois combustíveis veiculares: gasolina C, que corresponde a uma mistura de 73 a 75% de gasolina com 25 a 27% em volume de etanol anidro e etanol hidratado (E100). Atualmente estes combustíveis são utilizados na proporção aproximada de 66% de gasolina C e 34% de E100 no Brasil. Entretanto, quer use gasolina C, etanol hidratado ou qualquer mistura de gasolina e etanol, as emissões diurnas, de resfriamento, *running losses*, permeação e reabastecimento dos sistemas de combustível em veículos leves são fontes muito importantes dos compostos orgânicos voláteis (COV) que contribuem à formação de ozônio em áreas urbanas do Brasil. O objetivo deste artigo é apresentar uma análise da tecnologia, da eficácia, dos custos de controle, da relação custo-efetividade e do custo/benefício das exigências do PROCONVE L7 relacionadas à redução de emissões evaporativas e de reabastecimento. Este é o terceiro trabalho que aborda esses requisitos de maneira conjunta. O primeiro¹ abordou os impactos dos requisitos de controle avançado de emissões evaporativas adicionados aos requisitos do PROCONVE L6, para os modelos de veículos leves fabricados a partir de 2022. O segundo documento² abordou o controle das emissões de reabastecimento para veículos leves por meio do sistema embarcado de recuperação de vapor de combustível (*onboard refueling vapor recovery – ORVR*), com implantação de 20/60/100% exigida para os anos modelo 2023-2025. Essa análise foi feita de forma incremental ao controle avançado de emissões evaporativas estabelecido para 2022. Este trabalho combina essas duas análises e examina os impactos de ambos os programas.

A. Vapor de gasolina e reatividade para formação de ozônio

A gasolina base usada na gasolina C é uma mistura de classes de compostos orgânicos denominados parafinas, olefinas, naftenos e aromáticos, à qual é adicionado etanol na proporção de 25-27% em volume para conferir ao combustível as propriedades necessárias à gasolina automotiva e para atender às especificações e normas regulatórias. As proporções dessas classes de hidrocarbonetos e o hidrocarboneto individual variam de lote para lote de produto da refinaria. Os combustíveis brasileiros possuem no máximo 35% de aromáticos e 25% de olefinas em volume, com valores de etanol definidos na legislação nacional³. Além disso, a formulação de combustível deve ter alguns compostos com pressão de vapor mais alta para atender aos requisitos de pressão de vapor Reid e de temperatura de destilação.

Para avaliar os impactos das emissões de reabastecimento na qualidade do ar, três fatores são importantes. Primeiro, é a taxa de emissão de vapor durante o reabastecimento. Diversos estudos indicam um fator de emissão de cerca de 1,25 gramas de COV por litro abastecido, para combustíveis semelhantes à gasolina C⁴. Para o E100, esta emissão é de cerca de 0,35 gramas de etanol por litro, devido à menor pressão de vapor do etanol. Esta emissão se deve tanto ao deslocamento do vapor presente no tanque como a qualquer respingo do bocal de enchimento ao fechamento do bico⁵.

O segundo fator refere-se aos tipos de hidrocarboneto presentes no vapor da gasolina emitido para a atmosfera durante o reabastecimento. Quase todos os hidrocarbonetos da gasolina C serão encontrados no vapor de reabastecimento, mas a massa de vapor de cada componente dependerá da sua concentração no líquido, bem como da pressão de vapor específica de cada composto, da temperatura da gasolina no tanque e da temperatura da gasolina abastecida. O

cálculo dessas frações em massa é relativamente simples para as gasolinas tradicionais, que são soluções ideais. Misturas de gasolina com etanol, como a gasolina C, não são soluções ideais⁶. Nestes casos, a melhor forma de conhecer as concentrações de compostos individuais no vapor é através de medições do vapor no interior do tanque.

O terceiro conceito está relacionado à reatividade fotoquímica de cada composto, ou seja, à propensão de um determinado COV a reagir na atmosfera, criando ozônio. Na literatura técnica específica isso é chamado de Máximo Incremento da Reatividade fotoquímica– MIR (*Maximum Incremental Reactivity*) e expresso em gramas de ozônio por grama de COV ($\text{g O}_3/\text{g COV}$). O MIR é um parâmetro que foi estudado extensivamente para centenas de espécies de COV e as informações referentes a estes compostos nas emissões evaporativas e de reabastecimento são amplamente disponíveis⁷.

A Tabela 1 mostra os principais COVs no vapor encontrado no espaço superior de um tanque de combustível de um veículo para uma mistura de gasolina e etanol^{8,9}. A coluna 1 lista dos 40 compostos principais. As concentrações em massa dos compostos são mostradas na coluna 2 para o líquido e na coluna 3 para o vapor, enquanto que na coluna 4 é dado o valor de MIR. O produto entre a concentração em massa no vapor e o MIR representa a propensão do composto a criar ozônio, representado nas colunas 5, mostrando que controlar um composto com MIR relativamente baixo e uma concentração alta no vapor pode ser tão importante quanto controlar um composto com MIR elevado, apesar de ter uma pequena concentração no vapor.

Pode-se argumentar que os programas de controle de emissões devem se concentrar apenas nos COVs com os maiores valores de MIR, mas tal proposição não apresenta resultados práticos por dois motivos. Primeiro porque as tecnologias de controle de emissão de veículos, como conversores catalíticos e canisters de carvão ativado, utilizados em sistemas de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento, são muito eficientes na redução de emissões de praticamente todos os COVs. As emissões de alguns compostos podem ser reduzidas a níveis desprezíveis, ou mesmo abaixo dos níveis mínimos mensuráveis. No entanto, nem um catalisador nem um canister é 100% eficiente e nem reduz seletivamente apenas um determinado composto ou um conjunto de compostos. Em segundo lugar, a fotoquímica do ozônio é complexa e os inventários de compostos com baixo MIR apresentam valores grandes o suficiente para que suas contribuições para a formação de ozônio sejam significativas. Além disso, na cadeia de reações fotoquímicas que ocorrem na atmosfera, compostos de baixo MIR podem ser transformados em compostos de alto MIR.

Esses fatos são bem compreendidos e a abordagem geral utilizada em programas regulatórios busca reduzir as emissões de precursores de ozônio (COVs), independentemente dos valores específicos de MIR, e usar as reduções de ozônio fornecidas como parte da estratégia para atender aos padrões de qualidade do ar para ozônio.

Tabela 1: Mistura de Etanol e Gasolina

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
COV	Comb. líquido (% em massa)	Comb. vapor (% em massa)	MIR (g O ₃ /g COV)	MIR ponderado (3) * (4)	Reatividade (%)
Isopentane	6,75	20,44	1,68	34,34	12,94
Ethanol	25,00	19,00	1,45	27,55	10,38
n-butane	1,79	14,14	1,08	15,27	5,76
n-pentane	3,90	8,55	1,23	10,52	3,96
m- and p-Xylene	5,68	3,26	7,61	24,81	9,35
2-Methylpentane	3,46	2,84	1,41	4,00	1,51
Isobutane	0,20	2,18	1,17	2,55	0,96
Toluene	7,32	2,13	3,88	8,26	3,11
2-Methyl-2-butene	0,94	1,71	13,72	23,46	8,84
3-Methylpentane	2,16	1,47	1,70	2,50	0,94
2-Methyl-1-butene	0,52	1,29	6,23	8,04	3,03
trans-2-Pentene	0,63	1,28	10,25	13,12	4,94
n-hexane	2,42	1,28	1,15	1,47	0,55
1,2,4-Trimethylbenzene	2,95	1,24	8,64	10,71	4,04
2-Methylheptane	0,86	1,17	0,99	1,16	0,44
o-Xylene	2,24	0,91	7,44	6,77	2,55
2,3-Dimethylbutane	1,01	0,90	0,91	0,82	0,31
1-Pentene	0,32	0,85	6,97	5,92	2,23
1-Methyl-3-ethylbenzene	1,74	0,84	2,43	2,04	0,77
Ethylbenzene	1,58	0,81	6,39	5,18	1,95
cis-2-Butene	0,11	0,74	13,89	10,28	3,87
cis-2-Pentene	0,35	0,70	10,07	7,05	2,66
2,4-Dimethylpentane	1,46	0,70	1,46	1,02	0,39
Benzene	2,15	0,70	0,69	0,48	0,18
trans-2-Butene	0,09	0,63	14,79	9,32	3,51
3-Methyl-1-butene	0,11	0,61	6,76	4,12	1,55
2-Methyl-2-pentene	0,98	0,51	10,70	5,46	2,06
Cyclopentane	0,40	0,49	2,25	1,10	0,42
2,2-Dimethylbutane	0,32	0,41	1,11	0,46	0,17
1,3,5-Trimethylbenzene	0,85	0,38	11,44	4,35	1,64
1-Methyl-4-ethylbenzene	0,81	0,36	2,43	0,87	0,33
1-Methyl-2-ethylbenzene	0,78	0,31	6,39	1,98	0,75
1,3-Dimethyl-5-ethylbenzene	0,66	0,30	9,80	2,94	1,11
1,4-Diethylbenzene	0,55	0,29	6,39	1,85	0,70
Indane	0,38	0,27	3,20	0,86	0,33
Propylbenzene	0,57	0,27	1,95	0,53	0,20
1,2,3-Trimethylbenzene	0,74	0,25	1,66	0,42	0,16
1-Butene	0,03	0,24	9,42	2,26	0,85
n-octane	0,57	0,23	0,82	0,19	0,07
Cyclopentene	0,14	0,20	6,55	1,31	0,49

O vapor de etanol é uma parcela importante dos COVs no Brasil devido ao uso da gasolina C e E100¹⁰. Como pode ser visto na Tabela 1, dentre todos os componentes básicos da gasolina C, o etanol é um dos componentes de maior participação nas emissões de vapor nas misturas de gasolina e etanol e provavelmente está entre os dois ou três principais em concentrações ambientais devido às emissões que ocorrem na distribuição de combustível e nas emissões evaporativas, de reabastecimento e nos gases de escapamento¹¹. Entretanto, são necessários quatro comentários sobre as emissões de vapor de etanol. Primeiro, a emissão de COV do E100 em gramas de emissão por litro de combustível é de apenas 28% da gasolina C, mas a emissão específica de etanol para o E100 é cerca de 40% maior (0,35 g/L para o E100 versus 0,25 g/L para a fração de etanol no vapor da gasolina C). Segundo, como o valor de MIR do etanol é relativamente baixo (1,45), cada molécula individual de etanol contribui pouco para a formação de ozônio, mas isso é parcialmente compensado pelo fato de haver uma quantidade relativamente grande na atmosfera¹². Terceiro, existe uma cadeia de reações atmosféricas que converte as emissões de etanol em acetaldeído e deste em ozônio¹³ (o acetaldeído possui um MIR de 6,34). Finalmente, em alguns casos, o etanol pode se transformar em outro composto reativo conhecido como nitrato de peroxiacetila (PAN), que é um oxidante mais estável que o ozônio, podendo ser transportado a distâncias mais longas, cuja decomposição pode gerar ozônio¹⁴.

A Seção D, abaixo, apresenta uma análise de custo/benefício com foco na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A química atmosférica da formação de ozônio varia sazonalmente com a meteorologia e conforme as concentrações relativas dos precursores de ozônio na atmosfera mudam ao longo do tempo. Os estudos publicados em 2010¹⁵, 2017¹⁶ e 2018¹⁷ listaram o que suas pesquisas identificaram como os principais COVs precursores de ozônio nos períodos estudados (2006, 2006/2008 e 2011/2012, respectivamente). Dos 20 principais COVs encontrados na atmosfera, no estudo de 2010 foi determinado que o vapor de combustível continha 10, no estudo de 2017 foram 13 e no estudo de 2018, foram 8. Nos três estudos, a média foi de cerca de 10 dos 20 COVs participantes da formação de ozônio na atmosfera. Claramente, o vapor de combustível é um importante contribuinte para as concentrações de COVs precursores de ozônio. Além dos COVs das emissões evaporativas e de reabastecimento, os compostos identificados pelos pesquisadores são encontrados como produtos de combustão emitidos por veículos automotores e processos industriais e, em alguns casos, são provenientes de fontes naturais. Já existem limites relativamente rigorosos para as emissões de hidrocarbonetos para os gases de escapamento de veículos leves, motocicletas, caminhões e ônibus no PROCONVE e PROMOT. A redução desses COVs através do controle de emissões evaporativas de gasolina e etanol será muito útil para resolver o problema de ozônio, principalmente porque o controle das emissões evaporativas e de reabastecimento não evoluiu por mais de 15 anos e, atualmente, elas são 10 vezes maiores do que a emissão de escapamento em um veículo novo. A história do controle de emissões evaporativas e de reabastecimento no PROCONVE será discutida a seguir.

B. Experiência sobre emissões evaporativas e as novas tecnologias de controle

1. Controle das emissões evaporativas e de reabastecimento no PROCONVE

O Brasil adotou limites de emissão evaporativa (diurna e durante o resfriamento), pela primeira vez, para os veículos leves fabricados a partir de 1990 (PROCONVE L-1). Tanto os limites como

os procedimentos de teste e ciclos de ensaio foram baseados nos padrões de emissão da EPA dos EUA, em vigor naquela época. Posteriormente, os procedimentos de teste foram mantidos, mas o limite para as emissões evaporativas foi reduzido de 6,0 g/teste, aplicável a os veículos fabricados em 1990, para 2,0 g/teste para os fabricados a partir de janeiro de 2005 (PROCONVE L-4). Essa mudança não afetou a tecnologia dos veículos, uma vez que a sua maioria já apresentava emissões evaporativas abaixo desse nível desde 1990¹⁸. Além de uma pequena mudança no limite de emissão em 2015 (reduzindo de 2 g/teste para 1,5 g/teste) e uma permissão para adotar um método de medição alternativo (PROCONVE L-6), os procedimentos de teste são os mesmos e a tecnologia de controle dessas emissões permaneceu basicamente inalterada por 30 anos. O PROCONVE L-6 não inclui os requisitos de controle de emissões evaporativas diurnas por vários dias, nem em movimento ou durante o reabastecimento.

Em 2018, o CONAMA adotou o PROCONVE L7, que inclui dois conjuntos de requisitos relacionados às emissões evaporativas e de reabastecimento de veículos. O primeiro conjunto de requisitos, conhecido por “controle avançado de emissão evaporativa”, envolveu uma atualização substancial dos limites de emissão e dos procedimentos de teste para medição das emissões diurna e durante o resfriamento para os veículos fabricados a partir de 2022. Os limites de emissão diurna e durante o resfriamento foi estabelecido em 0,5 g/teste para um teste de 48 horas (dois ciclos de testes diurnos de 24 horas em série, sendo que o padrão deve ser cumprido em cada ciclo de teste de 24 horas em vez do requisito anterior de 2 g/teste em um ciclo de 1 hora). O segundo estabelece um padrão de emissão de reabastecimento de 0,05 g de vapor para cada litro de combustível abastecido o que, considerando o nível tecnológico atual, requer o uso da tecnologia denominada *Onboard Refueling Vapor Recovery* (ORVR). Este segundo conjunto de requisitos deverá ser implantado em etapas, para os veículos fabricados nos anos de 2023-2025 (20%/60%/100%). Os procedimentos de teste para esses novos padrões foram concluídos e agora estão sendo processados pela ABNT para publicação como procedimentos de teste padrão em uma norma ABNT NBR específica.

Em relação à tecnologia usada para conformidade com os requisitos de controle de emissões evaporativas do PROCONVE L6, aos novos requisitos tecnológicos viriam em duas fases. A primeira seria para o controle avançado de emissão diurna para 2022 e a segunda para a implantação do controle das emissões de reabastecimento progressivamente de 2023-2025. Conforme discutido adiante, espera-se que os fabricantes usem "sistemas de controle integrado de evaporação / reabastecimento" as duas fases de controle estiverem implantadas - a partir do ano modelo 2023. É possível que alguns fabricantes comecem a usar alguns ou todos os elementos deste projeto em 2022, reduzindo assim os encargos e os custos de engenharia.

É importante fazer uma observação relacionada aos combustíveis de teste de certificação e combustíveis em uso. Veículos dedicados a gasolina ou etanol são certificados apenas com E22 (gasolina com 22% de etanol anidro) ou E100 (etanol hidratado), respectivamente, porque utilizam somente um tipo de combustível, enquanto que os veículos flex podem operar com gasolina C (atualmente 27% de etanol e 73% de gasolina), ou com E100 ou qualquer proporção destes que resultem da mistura no tanque de combustível decorrente de abastecimentos diferentes. Nesse caso, os procedimentos de teste de certificação de emissões evaporativas e de reabastecimento exigem que um veículo flex atenda aos requisitos de emissão em uma mistura contendo E22 e em um conjunto separado de testes usando o E100. A demanda real em uso varia de acordo com a região. Nesta análise, foram utilizados dados da ANP indicando que, para o Brasil em geral, a proporção média de uso é de 66% de gasolina C e 34% de E100.

a. Tecnologia avançada de controle de emissões evaporativas:

Conforme ilustrado na Figura 1, um sistema de controle de emissão evaporativa aprimorado para o PROCONVE L7 usa o mesmo hardware básico que o sistema atual. Para incorporar o conceito avançado, são necessárias algumas alterações tecnológicas: (1) um aumento da capacidade do canister^c para capturar melhor as emissões diurnas e durante o resfriamento do tanque de combustível, (2) uma atualização na válvula de purga para melhorar sua capacidade de medir com maior precisão fluxo de ar para a purga do canister durante as várias condições de condução, (3) uma modificação da calibração de purga e (4) controle aprimorado da permeação de vapor de combustível pelo tanque de combustível e pelas linhas de combustível. Na maioria dos casos, a configuração do sistema de controle evaporativo no veículo será a mesma do sistema PROCONVE L6, incluindo a localização do canister, bem como as tubulações de vapor e linha de purga. Esse sistema funcionaria igualmente bem para a gasolina C e E100 e qualquer outra mistura de gasolina e etanol. O vapor de gasolina ou etanol capturado pelo canister do sistema de controle de evaporativas é purgado para o motor durante a condução do veículo e esse vapor é reaproveitado pelo veículo como combustível.

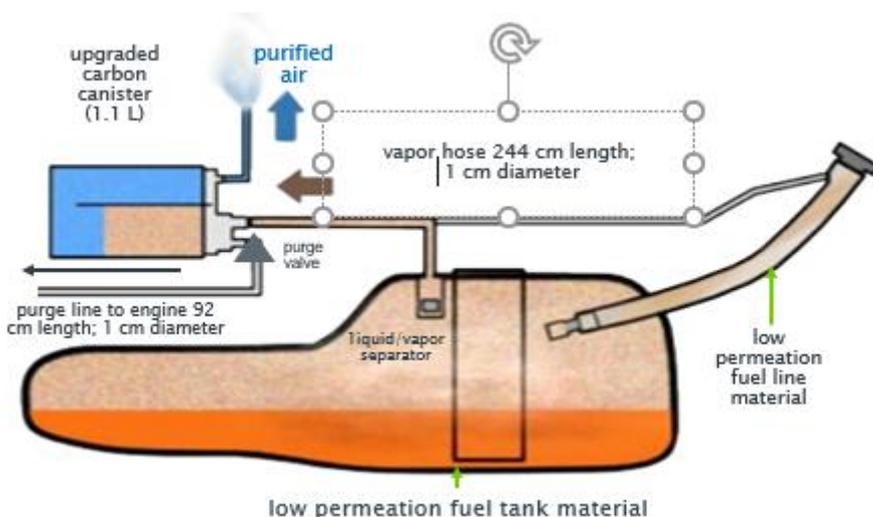


Figura 1: Sistema de controle avançado de emissões evaporativas para o PROCONVE L7

b. Recuperação de vapor de reabastecimento a bordo (ORVR):

Para o controle de emissões de reabastecimento, é comum utilizar um sistema integrado de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento (ORVR - *On-board Refueling Vapor Recovery*), que utiliza uma boa parte do mesmo hardware e tecnologia de componentes para controlar ambas as fontes de emissão.

^c Canister é um recipiente com carvão ativado para adsorver os vapores de combustível que seriam emitidos para a atmosfera e, durante o funcionamento do motor, este suga ar por seu interior para regenerar a sua capacidade de adsorção.

Como é ilustrado na Figura 2, o desenho de um sistema integrado transfere o canister da frente para mais perto do centro ou da traseira do veículo. Essa mudança reduz o comprimento da linha de vapor, mas com diâmetro um pouco maior, entre o tanque e o canister. Por sua vez, este é maior que o do sistema avançado de controle de emissões evaporativas, porque precisa adsorver maior carga de vapor (em gramas) em menos tempo, o que eleva a taxa de adsorção (gramas / minuto) durante um reabastecimento. A válvula de purga é a mesma, ou levemente aprimorada em sua calibração para os requisitos de teste de reabastecimento, e a linha de purga do canister para o motor é mais longa. O que há de novo é a alteração das dimensões do tubo de enchimento para formar um selo líquido para bloquear o retorno de vapor, uma válvula anti-respingo na parte inferior do tubo de enchimento para ajudar a desligamento automático do abastecimento e reduzir derramamentos e uma atualização da válvula múltipla do tanque de combustível para permitir maiores fluxos de vapor para o canister durante o reabastecimento e para incorporar uma função limitadora do preenchimento do tanque. Esse sistema integrado de controle de emissão evaporativa e ORVR funciona igualmente bem para a gasolina C, E100 e qualquer mistura de gasolina e etanol, sendo comumente usado nos EUA, Canadá e China.

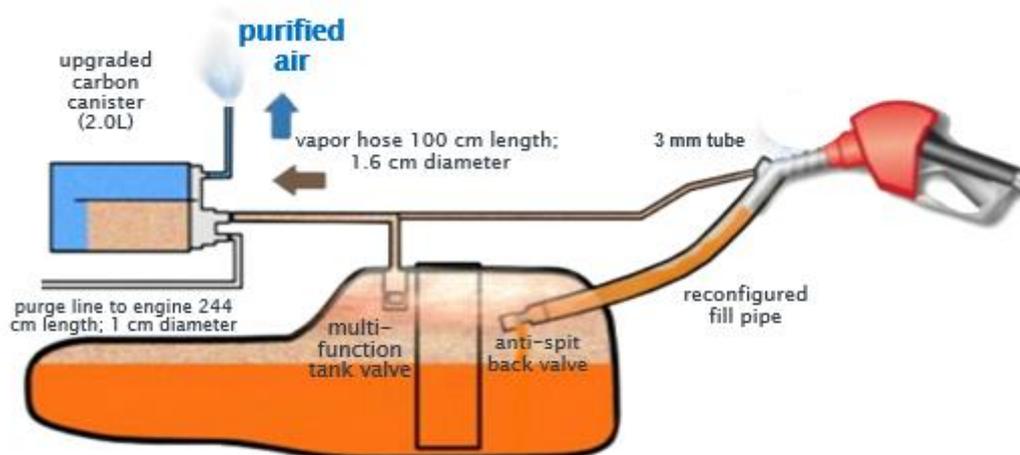


Figura 2: Sistema integrado de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento (ORVR)

Portanto, os custos de atualização para um sistema integrado de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento a partir dos projetos atuais são compartilhados entre os novos padrões PROCONVE L7 de medição em 48 horas de emissões diurna e durante o resfriamento para 2022 e os padrões requeridos para controle das emissões de reabastecimento (ORVR) para 2023-2025.

2. Por que a Europa ainda não adotou o ORVR

Inicialmente, é importante esclarecer o mito de que o programa de controle de emissões automotivas da Europa para emissões evaporativas deve ser usado como referência. A Europa não adotou nenhum padrão de emissão evaporativa até dois anos depois do Brasil e, na maior parte, o programa focou mais na permeação pelas paredes do tanque do que nas emissões de

vapor do sistema de combustível, como as emissões diurna e durante o resfriamento. Não houve atualizações significativas nos requisitos de controle das emissões evaporativas até 2019, e mesmo agora os padrões europeus apresentam um limite de 2 gramas de COV para medições feitas ao longo de 48 horas (ou cerca de 1 grama em 24 horas). Isso é duas vezes o padrão brasileiro estabelecido para 2022 e três vezes o padrão atual dos EUA. Além disso, deve-se notar que a Europa não possui normas para veículos pesados a gasolina (HDGVs). Os primeiros padrões dos EUA para HDGVs entraram em vigor em 1985 e desde 2018 os padrões dos EUA para HDGVs são mais rigorosos do que os padrões europeus de 2019 para automóveis.

No entanto, mesmo com os requisitos de ORVR estabelecidos nos dois maiores mercados automotivos do mundo, é surpreendente que a Europa não tenha harmonizado suas plataformas de sistemas de alimentação de combustível para ORVR e oferecido esse nível de controle aos seus Estados membro. Todos os fabricantes de automóveis europeus e fabricantes de automóveis que exportam apenas da Europa oferecem ORVR no mercado chinês, no mercado da América do Norte ou em ambos. Analisando retrospectivamente, há cinco razões pelas quais isso não ocorreu.

- Clima: geralmente, a UE não se vê com um problema de qualidade do ar por ozônio, não percebendo a necessidade de controle de VOC. A Europa é uma região climática diversa. Os problemas de ozônio são reconhecidos mais fortemente nas regiões mais quentes do sul. O clima do Brasil cai nesse regime climático mais quente e ensolarado.
- Estrutura dos padrões de qualidade do ar para ozônio (PQAR). O PQAR para ozônio é o limite estabelecido para o máximo valor diário das médias de 8 horas de medições de ozônio na atmosfera. Na EU, este limite é de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o que é numericamente bastante rigoroso, mas a conformidade em qualquer Estado membro é baseada em um período médio de três anos em que o padrão de ozônio não pode ser excedido, em média, mais do que 25 dias por ano. Isso permite que muitos dias excedam o PQAR de ozônio sem violar a legislação. Essa situação é ainda mais confusa pela maneira como a UE define seus limites de medição de conformidade. Além do requisito de que o padrão de ozônio se aplique a qualquer cidade com população acima de 250.000 habitantes, as diretivas da UE deixam que cada Estado membro defina suas regiões. Isso leva a uma grande disparidade entre as áreas cobertas por cada região, variando de 0,19 km^2 a 11.000 km^2 . Em grandes áreas, provavelmente não são observadas ultrapassagens do PQAR diário de 8 horas por ozônio.
- Predominância do uso de motores Diesel: existem diferenças tecnológicas entre a América do Norte, Brasil e Europa. Os automóveis europeus são predominantemente movidos a óleo diesel, não a gasolina ou misturas de gasolina com etanol. Existem relativamente poucos automóveis e veículos comerciais leves a diesel na América do Norte e no Brasil. O óleo diesel tem uma pressão de vapor muito baixa, portanto, os fatores médios de emissão evaporativas e de reabastecimento da frota são baixos. A Europa está agora abandonando os veículos a diesel, portanto, o controle de emissões evaporativas e de reabastecimento pode se tornar mais importante.
- Tomada de decisão para a política automotiva: o processo de tomada de decisão política para os padrões de emissão de veículos automotores na UE é diferente da América do Norte ou do Brasil. Embora qualquer política proposta seja desenvolvida por especialistas técnicos e representantes do governo e da indústria em vários comitês da Comissão Europeia (CE), os requisitos finais devem ser aprovados pelo Parlamento Europeu. Os 28 Estados membro da UE têm interesses diversos, com alguns sendo fortemente influenciados pelos fabricantes

de veículos. Chegar a um consenso para uma ação significativa nos controles evaporativos não é fácil. A diferença entre os requisitos norte-americanos e da UE foi identificada e avaliada pelas instituições técnicas da CE, que resultou na recomendação do ORVR para a EU, mas o progresso é lento em relação a estes novos requisitos.

- **Autoridade descentralizada para fontes locais:** Estados membro individuais têm muito mais independência no tratamento de fontes locais. Vários Estados membro implantaram a tecnologia de recuperação de vapor denominada Estágio II para reduzir a emissão de substâncias tóxicas do ar, como o benzeno presente no vapor de gasolina, em meados dos anos 90. Isso se espalhou lentamente para outros Estados membro e, em 2009, uma diretiva da CE foi estabelecida para a implantação do Estágio II até o final de 2019. Não está claro se a tecnologia de ORVR chegou a ser seriamente avaliada no nível estratégico, mas é evidente que a CE superestima a eficiência do Estágio II durante o uso real.

C. Custo-efetividade das tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento no Brasil

Custo-efetividade, apresentado como custo do controle de emissões por tonelada de poluente evitada, é o parâmetro mais comum usado para avaliar a eficiência regulatória e comparar diversas opções regulatórias concorrentes. Obviamente, quanto menor o valor de custo-efetividade, mais atraente se torna a opção de controle, mas, para atingir a meta ambiental, as opções consideradas devem ser aproximadamente equivalentes nas reduções de emissão que elas poderiam proporcionar. Ao avaliar a relação custo-efetividade das opções de controle de emissões veiculares, a análise envolve três elementos: o aumento de custo inicial para o veículo (que inclui despesas gerais e lucro), as alterações no custo de propriedade e as reduções de emissão no veículo, estas últimas tomadas ao longo de toda a sua vida útil. Para estabelecer valores monetários em uma base comum, os custos de propriedade são considerados no ano da compra do veículo gerando um valor presente líquido (VPL).

1. Tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas:

Nesta análise, utiliza-se uma abordagem *bottom-up* para verificar quais alterações seriam necessárias no sistema de controle avançado de emissões evaporativas do veículo para o PROCONVE L7 em relação ao usado para o PROCONVE L6. Estima-se que o custo adicional por veículo para as tecnologias discutidas acima e mostradas na Figura 1 para controles avançados de emissões evaporativas seja de US\$ 22 (além do custo do sistema já presente em veículos da fase PROCONVE L6). O sistema avançado de emissões evaporativas do veículo captura 80% das emissões evaporativas diurna e de resfriamento não controladas pela tecnologia PROCONVE L6. Os dados de tecnologias semelhantes usadas nos EUA desde 2004 mostram que mais de 96% dos veículos com tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas atendem ao padrão de emissão durante toda a vida útil do veículo. A taxa média de emissão em uso é de 0,32 g/teste para o ciclo de teste de 48 horas, semelhante ao exigido no PROCONVE L7, onde o padrão de emissão é definido em 0,5 g/teste¹⁹, não havendo necessidade de manutenção.

Adicionalmente, o aprimoramento da calibração do sistema de purga e a maior capacidade do canister de carvão ativado necessário para um controle avançado de emissões evaporativas

apresenta um benefício adicional muito positivo, pois também leva à captura extra de 45% das emissões evaporativas running losses, que são controladas nos EUA mediante regulamento adicional com teste e limite de emissão próprios, as quais não são controladas usando a tecnologia para atender ao PROCONVE L6 com padrão para teste de resfriamento e de emissão diurna de 24 horas^d.

No geral, esses vapores capturados (referentes às emissões diurna, de resfriamento e running losses) são queimados como combustível durante a vida útil do veículo, resultando em uma economia de combustível para o consumidor de cerca de US\$ 69 VPL.^{e,f} Assim, o consumidor obtém US\$ 47 de economia líquida devido ao vapor de combustível capturado e reutilizado.

Do ponto de vista do controle de emissões, as emissões diurna, de resfriamento e running losses capturadas pela tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas foram calculadas por veículo com base na quilometragem média anual percorrida e a estimativa de sua vida útil. A redução conjunta dessas quatro fontes foi estimada em 0,057 toneladas de COV por veículo, considerando uma vida útil da frota de 30 anos, na qual os veículos sobrevivem por 15 a 16 anos em média e rodam 12.725 km/ano.

O balanço geral de custo-efetividade da tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas estabelecido pelo PROCONVE L7 é:

$$(\$22-\$69)/0,057 \text{ ton} = - \$800 \text{ por tonelada de COV capturada}^g$$

Conforme mencionado acima, o processo do CONAMA estabeleceu dois procedimentos a serem exigidos no processo de certificação de veículos, visando a redução das emissões evaporativas de combustível. O primeiro estabelece um ensaio de 48 horas para avaliação das emissões diurnas e durante o resfriamento, o qual entra em vigor em 2022. O segundo, que leva ao uso do conceito ORVR para controle das emissões de reabastecimento, será implantado progressivamente entre 2023 e 2025. Assim, todos os veículos que venham a instalar sistemas ORVR já terão tecnologia para o requisito de controle avançado de emissões evaporativas. Para sistemas integrados de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento com ORVR, isso levará a custos adicionais mais baixos para o ORVR, se comparados ao controle de reabastecimento apenas.

2. Tecnologia de controle das emissões de reabastecimento (ORVR):

Para as emissões de reabastecimento, foram analisadas quais alterações adicionais seriam necessárias no sistema de controle avançado de emissões evaporativas para torná-lo um sistema integrado com o sistema de controle de emissões de reabastecimento (ou para integrá-lo ao sistema de controle de emissões de reabastecimento). Estima-se que o custo por veículo

^d A tecnologia para redução nas emissões em movimento, a ser comprovada com um procedimento de teste e um padrão específicos, exigiria a mesma tecnologia usada para o controle avançado de emissões evaporativas: um canister de maior capacidade e uma estratégia de purga aprimorada

^e A taxa de desconto de 3% para o valor presente líquido é comumente usada nas análises regulatórias da EPA dos EUA.

^f Este cálculo é feito considerando 66% de gasolina C e 34% etanol hidratado.

^g Nos EUA, um valor limite normalmente aceito é de cerca de US\$ 3000/ton. Um valor negativo como o calculado aqui significa que há uma economia líquida.

para a tecnologia de controle de reabastecimento, conforme discutido acima e mostrado na Figura 2, seja US\$ 23 além do custo do controle avançado de emissões evaporativas, permitindo capturar 98% das emissões de reabastecimento. Um estudo da JRC - Joint Research Center²⁰, organização técnica da Comissão Europeia, estimou que o custo total do sistema ORVR é de €16 a €29, integrado ao sistema de controle de emissão evaporativa diurna europeu que é equivalente ao atual brasileiro. A taxa média de emissão em uso é de 0,02 g/L para um veículo certificado pelo teste de emissão de reabastecimento, como o exigido no PROCONVE L7²¹. Não há manutenção necessária.

Adicionalmente, como no caso do controle avançado de emissões evaporativas, o aprimoramento da calibração do sistema de purga e a maior capacidade do canister de carvão ativado necessário para o controle das emissões de reabastecimento apresentam um benefício adicional muito positivo, pois também levam à captura extra de 45% das emissões running losses do veículo além do que é capturado pelo sistema de controle avançado de emissões evaporativas^h. Todos os vapores de reabastecimento e de emissão evaporativa capturados são queimados como combustível durante o uso ao longo de toda a vida útil do veículo, resultando em uma economia de combustível para o consumidor de cerca de US\$ 49 VPL^{ij}. Assim, o consumidor obtém US\$ 26 de economia líquida por causa do vapor de combustível capturado pelo sistema de controle de emissões de reabastecimento.

Do ponto de vista do controle de emissões, as emissões de reabastecimento e as evaporativas adicionais capturadas pela tecnologia de controle de emissões de reabastecimento foram calculadas por veículo durante toda a sua vida útil, com base na economia de combustível e na quilometragem média anual, resultando em reduções de emissão de 0,041 ton. de COV por veículo, considerando uma vida útil da frota de 30 anos, na qual os veículos sobrevivem por 15 a 16 anos em média, rodando 12.725 km/ano.

O balanço geral de custo-efetividade do ORVR é:

$$(US\$ 23 - US\$ 49)/0,041 = - US\$ 600 \text{ por tonelada de COV capturada}$$

Com um valor de custo-efetividade tão atraente, pode-se perguntar por que os fabricantes de automóveis não adotam o ORVR. Acredita-se que tal resistência deve-se a quatro motivos principais. Primeiro, os consumidores não reconhecem claramente as perdas econômicas devido às perdas por evaporação e reabastecimento. Segundo, os fabricantes de automóveis não estão dispostos a adicionar equipamentos e aumentar o custo dos veículos, mesmo que sejam apenas US\$ 23 por veículo, se não acharem que isso ajudará a vender veículos. Terceiro, os cidadãos não percebem uma ligação clara entre as emissões de vapor de combustível e a qualidade do ar, nem necessariamente os efeitos do ozônio ou de partículas adversos à saúde. No entanto, um estudo para São Paulo publicado em 2011 indica certa “disposição de pagar” pela redução dos impactos na saúde de adultos e crianças (internações hospitalares, consultas em pronto socorros)²². Quarto, no caso de emissões de reabastecimento, consideram que os atendentes dos postos de gasolina e os cidadãos que moram perto dos postos de gasolina são

^h A tecnologia para redução nas emissões em movimento, a ser comprovada com um procedimento de teste e um padrão específicos, exigiria a mesma tecnologia usada para ORVR: um canister de maior capacidade e uma estratégia de purga aprimorada.

ⁱ Este cálculo também é feito considerando 66% de gasolina C e 34% de etanol.

^j O fator de desconto de VPL de 3% é comumente usado nas análises regulatórias da US EPA.

os únicos que sentem os efeitos diretos da exposição ao vapor emitido durante o reabastecimento, não o motorista ou o proprietário do veículo.

3. Tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e controle de reabastecimento combinadas:

Avaliando conjuntamente a tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas e controle de reabastecimento, o custo total por veículo é de US\$ 45. O VPL combinado (a 3%) da economia de combustível é de US\$ 118, gerando uma economia líquida de US\$ 73 por veículo ao longo de sua vida útil. Usando os dois valores apresentados acima, a soma das reduções de emissão de COV ao longo da vida útil do veículo é de 0,12 toneladas.

O balanço geral de custo-efetividade das duas tecnologias combinadas é:

$$(US\$ 45-US\$ 118)/0,098 = - US\$ 750 \text{ por tonelada de COV capturada}^k$$

D. Custo/benefício das tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento no Brasil

A análise de custo/benefício considera a conveniência de uma regulamentação a partir de uma perspectiva social mais ampla. Em uma análise de custo/benefício, os custos resultantes da aplicação do regulamento são comparados com os benefícios sociais obtidos. Tais custos são normalmente avaliados aplicando as mesmas categorias usadas em uma análise de custo-efetividade, mas para toda a frota em um determinado ano. Os benefícios se enquadram amplamente em duas categorias. Na primeira estão os efeitos na saúde, correspondendo uma avaliação dos impactos positivos em relação à morbidade e mortalidade²³. A morbidade é geralmente expressa como o custo associado às internações hospitalares e aos atendimentos nos pronto socorros para garantir a precisão dos dados (representado pelo custo do SUS no Brasil). No entanto, essa abordagem não é sensível aos custos associados a itens como dias de trabalho perdidos, menor produtividade e reclusão em casa por enfermidades²⁴. A mortalidade é expressa como mortes prematuras evitadas e quantificada como o valor de cada ano de vida perdido (VOLY) ou o valor da perda de uma vida (VSL) estimado estatisticamente²⁵. VOLY é o valor econômico usado para quantificar o benefício de evitar uma fatalidade que reduza um ano na expectativa de vida de alguém. O VSL é um conceito econômico utilizado para estimar quanto as pessoas estão dispostas a pagar por pequenas reduções do risco de morrer devido a problemas de saúde que podem ser causados pela poluição ambiental. É usado principalmente em análises de impacto regulatório e pesquisa científica. Sintetiza o valor que a sociedade atribui à prevenção da morte de qualquer pessoa. Ambas as abordagens têm valor na compreensão e quantificação do valor econômico de reduzir ou eliminar o número de mortes prematuras. No entanto, o VOLY cobre apenas um ano e é necessário conhecer o número médio de anos de vida salvos para calcular um valor total. O VSL é o valor preferido, pois aborda melhor o valor econômico para eliminação total do risco.

^k Nos EUA, um valor limite normalmente aceito é de cerca de US\$ 3000/ton. Um valor negativo como o calculado aqui significa que há uma economia líquida.

O segundo benefício refere-se aos efeitos econômicos do bem-estar e prejuízos materiais, que corresponde a uma avaliação de impactos positivos em áreas como produção agrícola, danos materiais, flora dos ecossistemas e mudanças climáticas²⁶. Geralmente, existem poucos dados específicos sobre o valor monetário dos benefícios sobre o bem-estar e prejuízos materiais, de maneira que as estimativas aplicadas são de ordem geral.

Pesquisadores e organizações governamentais no Brasil avaliam o problema da influência do ozônio na qualidade do ar das cidades brasileiras há algum tempo. Mesmo com a escassez de dados e tempo relacionadas a essa avaliação, há informações disponíveis para usar um método de simulação da situação presente, caso a medida tivesse sido implementada no passado ("*backcast*") para avaliar o custo/benefício da tecnologia para o controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento¹. Nesse caso, os dados para a análise são limitados à RMSP, mas os resultados podem ser estendidos a outras áreas urbanas menores no Brasil, que apresentam problemas de qualidade do ar por ozônio, como discutido mais adiante. A RMSP é a área urbana com a maior população, maior atividade (população de veículos, tráfego e uso de combustível) e o problema mais significativo da degradação da qualidade do ar por ozônio no Brasil. A RMSP possui 15,6% da frota de veículos leves no Brasil²⁷. Além disso, outro estudo mostrou que as 20 regiões metropolitanas mais populosas concentram 40% da população e da frota de veículos do país²⁸.

Nesta abordagem "*backcast*", é selecionado um ano para análise e todos os fatores que afetam as concentrações atmosféricas de ozônio são definidos como efetivamente ocorreram no ano selecionado, exceto os programas em análise. Isso inclui itens como características da frota, inventários de emissões de COV e de óxidos de nitrogênio (NOx) e meteorologia. Isso é importante porque todos esses fatores afetam a química atmosférica que cria o ozônio, de maneira que fixá-los nos valores existentes no ano em análise, permite prever os efeitos da tecnologia para o controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento sobre os COVs e, conseqüentemente, sobre as concentrações de ozônio. Como será discutido mais adiante, optou-se por analisar o efeito da tecnologia para o controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento usando dados de 2018, uma vez que este é o último ano para o qual a CETESB produziu o inventário completo de COV e processou e publicou os dados de concentração atmosférica de ozônio para a RMSP.

Na modelagem feita, os únicos termos que são diferentes do inventário da CETESB tomado como base são os valores das emissões evaporativas e de reabastecimento para a fase PROCONVE L6. Ao invés de usar os valores de 2018 fornecidos pela CETESB para a RMSP para essas emissões, o inventário utilizado para 2018 foi calculado com base nos valores mais representativos desenvolvidos para o processo CONAMA que promulgou a fase L7 do PROCONVE em 2018^m. Esse inventário base não inclui os benefícios das tecnologias do controle

¹ A abordagem *backcast* utilizada aqui é um método de análise retrospectiva no qual os efeitos da mudança ou conjunto de alterações regulatórias podem ser isolados, enquanto todos os outros elementos do inventário de COV e demais fatores que afetam a formação de ozônio são mantidos inalterados. Um método prospectivo requer que os efeitos de todas as mudanças que afetam o inventário e a formação de ozônio sejam identificados e quantificados para um ano futuro. Para uma análise prospectiva, a precisão dos resultados depende fortemente da precisão dos valores de entrada, muito imprecisos para previsões 20 ou 30 anos à frente.

^m O inventário de emissões evaporativas e de reabastecimento utilizado na análise deve estar alinhado com o apresentado ao grupo técnico do CONAMA e ser consistente com os procedimentos de teste e

avançado de emissão evaporativa e de reabastecimento. As reduções de emissões para essas tecnologias também foram obtidas daquelas preparadas para discussão na Câmara Técnica do CONAMA.

Sob esse método de "backcast" para avaliar o custo / benefício, a modelagem é baseada na hipótese de ter ocorrido a substituição total da frota. Além disso, todos os veículos a gasolina, a álcool e flex da frota são certificados com os padrões avançados de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento e requisitos de durabilidade usando gasolina C e E100 ou apenas E100 para um veículo dedicado para etanol.

A etapa final dessa abordagem de *backcast* corresponde à determinação dos efeitos da tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento sobre o inventário de emissões de COV na RMSP. As reduções de emissão de COV obtidas pelo uso da tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento divididas pelo inventário-base de COV produz a redução percentual das emissões. Este fator foi usado para determinar o efeito sobre as concentrações de ozônio.

São necessários seis grupos de informações para realizar a análise custo/benefício, conforme apresentado e discutido a seguir.

1. Custos de controle na frota de 2018 equipada com controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento em todos os veículos.

A frota de veículos leves em uso em 2018 é composta por veículos com idades entre 1 e 30 anos. A parcela de cada ano modelo na frota depende das vendas do ano modelo considerado e da taxa de sobrevivência da frota desse ano modelo em 2018. Os custos de controle para toda a frota de veículos em uso de 2018 requerem cálculos que abrangem os custos do equipamento de controle em cada ano-modelo considerado para o comprador e os custos operacionais.

- a. Equipamento de controle: para o custo de compra, existem dois cálculos. O primeiro é o custo anualizado para o sistema avançado de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento, o qual se baseia no custo de compra de cada veículo (custo incremental de US\$ 45) anualizado ao longo de uma vida útil de 30 anos. O custo anualizado é usado porque a análise é feita para apenas um ano da vida útil do veículo (2018), não para a totalidade. O segundo cálculo é o valor futuro. Esse termo é calculado com base em juros compostos de 3% ao ano a contar do ano de venda do veículo até 2018. O custo da frota para 2018 é então igual à soma dos produtos de (custo anualizado x vendas do ano modelo x taxa de sobrevivência para o ano modelo considerado em 2018 x valor futuro para o ano modelo)ⁿ para os anos 1989 a 2018. Usando essa abordagem, o custo do sistema avançado

limites de emissão estabelecidos na nova Resolução. O PROCONVE, no que tange ao controle de emissões evaporativas e de reabastecimento de veículos leves, é baseado nos procedimentos e padrões de teste da EPA dos EUA e pode ser bem representado pelo modelo de emissões MOVES da EPA. O inventário da CETESB utiliza fatores de emissão adaptados do Guia Europeu para inventário de emissões (do modelo COPERT) e, portanto, não aplicáveis ao Brasil.

ⁿ O custo anualizado é de US\$1,5 (US\$45/30 anos), considerando as vendas de veículos leves a gasolina, flex and E100 entre 1989 e 2018 obtidas de IHS Markit e do anuário da ANFAVEA. As taxas de sobrevivência em função da idade adotadas foram obtidas dos dados da CETESB, e o valor futuro calculado é de $1,03^{\text{idade}}$, onde os veículos de 2018 são considerados zero quilômetro.

de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento em 2018 para todos os veículos leves da frota da RMSP seria de cerca de US\$ 12 milhões.

- b. Custos operacionais: As tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e das emissões de reabastecimento não aumentam os custos de manutenção, mas reduzem o custo operacional como foi o caso da discussão de custo-efetividade acima, onde o vapor capturado no sistema de controle é recuperado e queimado como combustível pelo veículo. Para o ano inventário de 2018, os dados do IHS estimaram a quilometragem total percorrida pelos veículos leves no Brasil em 483 bilhões de quilômetros²⁹, sendo 75,3 bilhões de quilômetros na RMSP. Esse valor multiplicado pelo volume de combustível recuperado (em g/km), pelos fatores de conversão apropriados e pelo preço ponderado do combustível em 2018, gera um crédito de combustível em favor das tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento de US\$ 46,6 milhões em 2018 para a RMSP^{o,p}. Este valor reflete a economia de toda a frota em uso em 2018, não de um único veículo ao longo da sua vida útil.

2. Informações sobre o inventário de COVs precursores de ozônio na RMSP em 2018:

O inventário de COVs precursores de ozônio de origem antropogênica na RMSP no ano de 2018 corresponde à soma das emissões de fontes fixas e móveis. As fontes estacionárias incluem atividades como indústria leve e pesada, refino de petróleo, geração de energia, armazenamento e distribuição de combustível, produção e uso de produtos químicos e solventes e processamento de alimentos. As fontes móveis incluem emissões de escapamento, evaporativas e de reabastecimento de veículos leves, caminhões médios e pesados, ônibus e motocicletas.

A Tabela 2 apresenta um resumo do inventário de COV da RMSP para 2018. Ela inclui os ajustes discutidos anteriormente para incorporar os programas de controle de emissões evaporativas e de reabastecimento estabelecidos no PROCONVE L6 e PROCONVE L7, usando a abordagem desenvolvida durante a tramitação do processo no CONAMA, exceto para o mercado de combustíveis, de 50% de gasolina C e 50% de combustível E100, tomado como base. Note-se que, no cenário “2018 com controle de evaporativas de 48h” a magnitude do inventário de emissões de escapamento dos veículos leves é pequena em relação à do inventário de emissões evaporativas. Embora possa haver algumas atualizações necessárias na estimativa de escapamento, essa diferença ocorre principalmente porque os limites de emissão de escapamento para NMHC (hidrocarbonetos exceto metano) e aldeído se tornam progressivamente mais rigorosos com o tempo, mas não tem havido mudanças substanciais na tecnologia requerida para atendimento aos limites das emissões evaporativas, sendo que as emissões evaporativas do veículo em movimento e de reabastecimento não são controladas.

^o Para a RMSP, assumiu-se a proporção de 50% de uso de gasolina C e de etanol no consumo anual de 2018.

^p $(75,3 \times 10^9 \text{ km/ano})(0,414 \text{ g/km})(1\text{L}/740 \text{ g})(\text{R}\$4,19/\text{L})(1\text{US}\$/\text{R}\$3,68)$

Tabela 2: Inventário de emissão de COVs da RMSP em 2018 pela abordagem de *backcast* (toneladas/ano)

	Fontes Estacionárias ^{30,9} (HC)	E100, Gasolina, Flex Gasolina					Diesel			Total
		Veículos leves					Motos	Caminhões	Ônibus	
		Escape ³¹ (NMHC+aldeídos)	Evaporativas				Escapamento			
			Estacionado ^r	Resf.	Movimento.	Abast.	NMHC			
2018 c/evap. L6	9280	9580	7343	935	25504	6172	2933	790	472	63009
2018 c/48h	9280	9580	1231	450	13669	6172	2933	790	472	44577
2018 c/48h + ORVR	9280	9580	1148	450	7036	124	2933	790	472	31813

Notas:

Cenário 1: inventário de 2018 com emissões evaporativas medidas em ensaio de 2-h, conforme fase L6

Cenário 2: inventário de 2018 com emissões evaporativas medidas em ensaio de 48-h, conforme fase L7/2022

Cenário 3: mesmo cenário 1 com adição da tecnologia ORVR

48h = teste de emissões evaporativas que requer a implantação da tecnologia de controle avançado

ORVR = tecnologia de controle das emissões de reabastecimento

As reduções no inventário são muito grandes. Para a tecnologia de controle avançado de emissões evaporativas, a redução é de 18.432 toneladas por ano de VOC, enquanto que a tecnologia de controle de emissões do reabastecimento reduz mais 12.764 toneladas por ano de VOC. No total, a redução combinada dos dois requisitos do PROCONVE L7 é de 31.196 toneladas por ano de VOC. Trata-se de uma redução de 78% nas emissões evaporativas e de reabastecimento para veículos leves e uma redução de 49% no inventário total de VOC antropogênico modelado para a RMSP. Essas reduções são de tal magnitude que jamais poderiam ser obtidas no controle das emissões de escapamento.

3. Informações sobre a qualidade do ar por ozônio para a RMSP para 2018³²:

O padrão atual de ozônio (O₃) para o Brasil é de 140 microgramas por metro cúbico (µg/m³) para uma média móvel de 8 horas. Esse valor foi estabelecido tanto para o padrão primário (saúde), como para o padrão secundário (bem-estar e prejuízos materiais). Em 2018, houve 18 dias com violações desse padrão em 23 locais de monitoramento diferentes da RMSP. Houve um total de 44 períodos de 8 horas acima do padrão de ozônio³³. A Tabela 3, a seguir, mostra um declínio nas violações nos quatro anos anteriores, mas o relatório da CETESB atribui parcialmente essas

⁹ As fontes estacionárias incluem COVs (gasolina C e E100) do carregamento de caminhões-tanque nos terminais, transferência e armazenamento de combustível em reservatórios subterrâneo em postos de gasolina. Não inclui a distribuição ao veículo.

^r Estacionado inclui emissões diurnas e de permeação.

reduções a condições meteorológicas favoráveis, concluindo que isso não indica necessariamente uma tendência favorável³⁴. Além disso, a crise econômica reduziu as atividades de transporte e industriais no mesmo período, causando reduções adicionais das emissões, o que também favorece a diminuição dos níveis de ozônio. No entanto, essa tendência deve se reverter com a recuperação econômica, como parece ser o caso com base em dados preliminares de 2019.

Tabela 3: Violações do padrão de ozônio na RMSP

	Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
PQAr-8h	2013	0	5	1	1	1	0	0	0	2	0	2	1	13
	2014	8	8	1	1	0	0	0	1	3	13	4	4	43
	2015	12	2	3	0	0	0	0	3	6	6	3	1	36
	2016	4	3	2	6	0	0	0	1	0	4	5	7	32
	2017	1	3	0	0	0	0	0	2	12	5	1	4	28
	2018	2	2	2	1	1	0	1	0	0	0	0	9	18

Fonte: CETESB (2019)

Os números da tabela acima provêm da comparação das concentrações de ozônio com o padrão de $140\mu\text{g}/\text{m}^3$ atualmente em vigor. No entanto, a Resolução CONAMA 491/2018 estabelece dois novos padrões-meta intermediários e um final a serem implantados futuramente no Brasil para atender às metas da Organização Mundial da Saúde para ozônio, que é de $100\mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando os níveis diários de ozônio publicados no QUALAR (banco de dados de qualidade do ar da CETESB) com os diferentes padrões de ozônio (como mostrado na tabela 4), fica claro que essa tendência de reversão representa um problema para o atendimento aos padrões futuros de ozônio, uma vez que o número de violações aumenta significativamente (mais de 50% do tempo durante a temporada de ozônio).

Tabela 4 - Tendências das violações dos padrões futuros de ozônio na RMSP

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	STD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
13	43	36	32	28	18	41	PQAr - $140\mu\text{g}/\text{m}^3$
30	63	57	47	47	29	64	M ₁₂ - $130\mu\text{g}/\text{m}^3$
55	84	82	67	63	47	91	M ₁₃ - $120\mu\text{g}/\text{m}^3$
91	135	125	121	111	114	148	M _{Final} - $100\mu\text{g}/\text{m}^3$

Nota: Os dados e violações dos padrões intermediários de ozônio para 2019 foram calculados a partir das concentrações horárias de ozônio do banco de dados da CETESB (QUALAR) em cada estação de monitoramento, a cada dia.

Três outros conjuntos de informações importantes são mostrados na Tabela 5 (do item 5), obtidos a partir das informações fornecidas pela CETESB para as 23 estações de monitoramento

na RMSP³⁵. A coluna 2 da tabela lista a concentração média diária das médias móveis de 8 horas de ozônio em cada estação da RMSP. A média de todas as 23 estações é de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. As colunas 3-6 apresentam a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª maiores médias de ozônio em períodos de 8 horas em cada estação. Finalmente, as colunas 7 e 8 apresentam o número de ultrapassagens do padrão brasileiro de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o ozônio e, para comparação e discussões posteriores, as ultrapassagens da meta da OMS para o ozônio, que é de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a qual já está programada para ser implantada no Brasil como padrão em uma data futura, de acordo com a Resolução CONAMA 491/2018.

4. Como um novo regulamento alteraria o inventário e a qualidade do ar por ozônio

Vários pesquisadores realizaram extensos estudos sobre a relação entre a magnitude do inventário de precursores de ozônio e as concentrações de ozônio em São Paulo. Através deste trabalho, eles desenvolveram uma ferramenta geral para prever como as reduções no inventário de COV em São Paulo afetariam as concentrações de ozônio^{36,37,38}. Os resultados dos três estudos variam, mas existem quatro resultados comuns: (1) os resultados dependem da meteorologia para os anos estudados, (2) a primavera e o verão brasileiros (meses de outubro a março) são os meses dominantes para formação de ozônio (também mostrado na Tabela 3 acima), (3) alguns COVs são mais reativos do que outros para a formação de ozônio, mas uma redução de COVs em geral, incluindo aqueles com maior e menor reatividade, reduz as concentrações de ozônio na área urbana e (4) as reduções de NOx devem ser planejadas em conjunto com as de COV para não aumentar as concentrações de ozônio nem de NOx na área urbana.

Nesta análise, optou-se por usar os resultados do estudo publicado por Orlando et al em 2010, que recomenda as reduções de COV como estratégias de controle de ozônio. Ele se baseou no inventário da CETESB para sua modelagem e cobriu as quatro estações do ano. Também é importante que abranja todos os COVs, incluindo o etanol, que é um poluente importante na composição do ar urbano. A Figura 3, extraída do artigo publicado por Orlando et al (página 1617) apresenta uma relação direta entre a redução das concentrações de ozônio e uma diminuição no inventário de COV para cada uma das quatro estações do ano. Na seção anterior, sobre impactos do inventário de emissões sobre a qualidade do ar, estimou-se que quando as tecnologias de controle avançado das emissões evaporativas e de controle das emissões de reabastecimento estiverem completamente implantadas na frota da RMSP deverá ocorrer uma redução no inventário de COV da RMSP estimada em 49%. O gráfico da figura 3 não atinge 49% de redução de COV, mas a correlação entre COV e ozônio apresenta uma tendência claramente linear. Assim, a redução prevista de ozônio deverá ser de cerca de 50% para a primavera e o verão, quando os problemas de ozônio são mais comuns, e 64% para o outono e inverno quando as concentrações de ozônio são mais baixas.

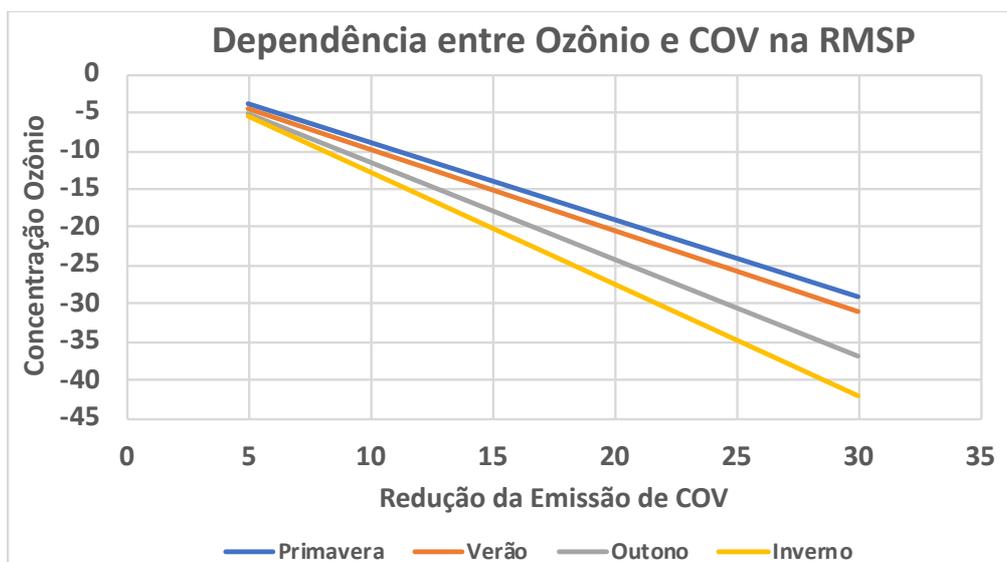


Figura 3 – Variação percentual das concentrações de O₃ em função das reduções de COV nas quatro estações do ano (fonte: Orlando et al.)

5. Impacto econômico sobre a saúde, bem-estar e prejuízos físicos resultantes da redução do ozônio na atmosfera

A Tabela 5 apresenta a qualidade do ar com os dados de ozônio para a RMSP³⁹. A análise do inventário apresentada na Tabela 2 indica que o controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento reduziria o inventário de VOC em cerca de 49% e, usando essas informações, a análise feita na seção imediatamente anterior indica uma redução de ozônio em cerca de 50% na primavera e verão, que são as estações mais críticas. A aplicação dessa redução percentual aos níveis de ozônio de 2018 mostrados na Tabela 5 produz um novo perfil de ozônio correspondente a um cenário em que as tecnologias de controle avançado das emissões evaporativas e de controle das emissões de reabastecimento estivessem totalmente implantadas na frota de veículos leves (cinco últimas colunas da tabela 5).

Tabela 5 - Dados da qualidade do ar por ozônio da RMSP - médias de 8 horas ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) - 2018

Estação de Monitoramento	Medições sem a implantação da fase L7							Estimativas após a implantação da fase L7				
	média 2018 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valores Máximos em 2018 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Violações em 2018		Nova média ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Novos Valores Máximos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		1°	2°	3°	4°	>140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	>100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		1°	2°	3°	4°
Capão Redondo	36	136	134	124	123	0	22	18	68	67	62	62
Carapicuíba	36	136	133	128	128	0	28	18	68	67	64	64
Cid.Univ.- USP-Ipen	35	153	135	134	130	1	46	18	77	68	67	65
Diadema	35	177	160	147	137	3	26	18	89	80	74	69
Grajaú-Parelheiros	44	144	127	126	124	1	28	22	72	64	63	62
Guarulhos-Paço Mun	37	144	137	134	132	1	33	19	72	69	67	66
Guarulhos-Pimentas	42	138	134	133	122	0	27	21	69	67	67	61
Ibirapuera	41	174	156	153	142	4	59	21	87	78	77	71
Interlagos	40	152	146	141	138	3	43	20	76	73	71	69
Itaim Paulista	38	133	130	126	124	0	25	19	67	65	63	62
Itaquera	39	162	157	153	146	6	37	20	81	79	77	73
Mauá	32	130	122	119	114	0	9	16	65	61	60	57
Mooca	34	130	121	117	116	0	19	17	65	61	59	58
N.Senhora do O.	30	122	122	118	118	0	23	15	61	61	59	59
Parque D. Pedro	34	164	122	122	121	1	30	17	82	61	61	61
Mogi das Cruzes	50	158	143	141	138	3	25	25	79	72	71	69
Pico do Jaragua	51	148	147	136	135	2	70	26	74	74	68	68
Pinheiros	28	150	124	123	116	1	11	14	75	62	62	58
S.André-Capuava	37	172	151	142	139	3	28	19	86	76	71	70
S.Bernardo-Centro	41	162	159	156	156	9	40	21	81	80	78	78
Santana	33	155	145	139	138	2	40	17	78	73	70	69
Santo Amaro	29	125	120	115	115	0	13	15	63	60	58	58
São Caetano do Sul	39	181	171	157	150	4	42	20	91	86	79	75
Violações (>140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)						44	724		0	0	0	0
Médias	37	150	139	134	131			19	75	69	67	65
Diferenças								18		75	70	67

Como pode ser visto na Tabela 5, as concentrações médias caem 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e os maiores valores previstos de ozônio situam-se na faixa entre 61 e 91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para todas as estações, eliminando as violações completamente consideradas as condições atuais das demais fontes de emissão. Após a implantação das tecnologias de controle avançado das emissões evaporativas e de controle das emissões de reabastecimento em toda a frota, a análise indica a inexistência de violações do padrão de ozônio, mesmo considerando a meta da OMS, de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Embora essa análise sugira um grande progresso em direção à conformidade da atmosfera, é necessária cautela em diversos pontos. Primeiro, isso não pressupõe reduções compensatórias nas emissões de NOx. Segundo, conforme relatado pela CETESB, os valores de ozônio de 2018 usados aqui são relativamente baixos em comparação com os quatro anos anteriores.⁴⁰ Terceiro, é possível que haja outros aumentos no inventário de COV relacionados a um aumento no número de veículos da frota, quilometragem média anual e, conseqüentemente, no uso de combustível, bem como maiores emissões de COV de outras atividades industriais. Quarto, como foi afirmado acima, a formação de ozônio depende muito da meteorologia e obviamente isso pode ser diferente em cada estação de ozônio. Finalmente, a substituição total da frota leva 30 anos; portanto, outras medidas podem ser necessárias para reduzir os VOCs nos anos intermediários.

Apesar das incertezas apresentadas acima, não há dúvida de que as reduções de VOC resultantes do controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento nas concentrações de ozônio na RMSP são muito importantes e decisivas para a solução dos problemas de ozônio na atmosfera, à luz dos conhecimentos e das condições atuais. Como pode ser visto na Tabela 5, todos os novos valores máximos previstos estão muito abaixo do padrão de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio. Por fim, vale ressaltar que essa avaliação se baseia nos dados da RMSP, pois é a área mais populosa, bem conhecida e estudada, mas conclusões semelhantes são

válidas para as demais áreas altamente urbanizadas. Além disso, o monitoramento da qualidade do ar no estado de São Paulo mostra que mesmo cidades pequenas estão expostas a altas concentrações de ozônio, durante eventos meteorológicos favoráveis à formação deste poluente, como registrado pela CETESB em 2018 ⁴¹. Aplicando a redução de 50% das concentrações de ozônio estimada caso a fase P7 estivesse implantada as violações do padrão de ozônio de 100 µg/m³ naquele mesmo evento atmosférico também teriam sido eliminadas no interior do Estado. Essas observações reforçam que o controle de emissões veiculares deve ser feito em toda a frota, de todo o país.

6. Quantificação do valor monetário desses benefícios positivos

Em julho de 2016, Abe *et al.* publicaram um artigo que contém um algoritmo que permite estimar os efeitos do impacto das reduções de ozônio sobre a saúde e quantificar seus benefícios monetários⁴². Este estudo, que utilizou dados de 2009-2011, previu mudanças positivas nas internações relacionadas a problemas do sistema respiratório para adultos e idosos e o número total de mortes prematuras evitadas. O estudo mostra benefícios para a saúde se todos os valores de ozônio maiores que 100 µg/m³ fossem reduzidos a este nível (meta da OMS) ou menos, ou se a concentração média de ozônio fosse reduzida em 5 µg/m³. As reduções de ozônio devidas à combinação das tecnologias de controle avançado das emissões evaporativas e do controle das emissões de reabastecimento levariam ao atendimento do cenário de 100 µg/m³.

A RMSP tinha cerca de 21,7 milhões de habitantes em 2018. Dessa população, 72% são adultos entre 15 e 64 anos de idade e 9% têm mais de 64 anos. As informações sobre efeitos do atendimento à meta de 100 µg/m³ de ozônio sobre a saúde estão mostradas abaixo, com base na população atual da RMSP, com custos ajustados pela inflação desde 2009. Basicamente, conforme discutido anteriormente, existem duas maneiras de valorar a prevenção de mortes prematuras. A primeira, considera valor da redução de um ano na expectativa de vida (*value of life year - VOLY*), usado em alguns tipos de análise de custo-benefício e preferido por alguns analistas, baseia-se em pesquisas sobre o que um indivíduo estaria disposto a pagar em troca de um ano de vida adicional ou, inversamente, a perda de um ano de expectativa de vida. A segunda abordagem que considera o valor estatístico de uma vida (*value of a statistical life - VSL*), é baseada em pesquisas sobre o quanto um entrevistado pagaria para evitar uma morte prematura e não apenas para adicionar um ano à expectativa de vida. Nesse caso, acredita-se que o entrevistado considera fatores inerentes à sua idade, expectativa de vida e outros fatores na formulação de sua resposta. Os autores do artigo de julho de 2016 (Abe *et al.*) extraíram o valor VOLY de um extenso trabalho da Comissão Europeia realizado em 2005⁴³. A deficiência dessa abordagem para este artigo não é o valor monetário de VOLY ou a estimativa de mortes prematuras evitadas, mas para calcular um VOLY total, é necessário incluir também uma estimativa da média de anos de vida perdidos para a população sob risco na RMSP. Tais informações não estão disponíveis e, sem elas, o método VOLY não pode ser aplicado com credibilidade. Este mesmo documento de 2005 também discute a abordagem VSL especificamente para a poluição do ar e considera um valor de um milhão de Euros como o valor monetário do VSL. Usando o VSL, uma morte prematura evitada seria avaliada em US\$ 1,45

milhão em 2018⁵. Outros estudos mostram valores semelhantes ao VSL utilizado aqui. Por exemplo, um estudo recente para São Paulo estimou custos de saúde de US\$ 1,65 milhão por cada violação do padrão de 140 µg/m³ de ozônio⁴⁴. Para 2018, um ano notavelmente bom do ozônio, esse custo teria sido de quase US\$ 30 milhões. Para o regulamento de veículos automotores China 6, recentemente promulgado, o Ministério de Ecologia e Meio Ambiente chinês usou um valor de US\$ 1,89 milhão⁴⁵. Atualmente, a EPA dos EUA adota o valor VSL de US\$ 6,3 milhões, utilizado em sua regulamentação de emissões de veículos de Nível 3 para 2014. Isso é quatro vezes maior que o valor usado neste trabalho, com base no estudo europeu⁴⁶.

Tabela 6 - Benefícios potenciais à saúde pela redução da concentração máxima de ozônio abaixo de 100 ug/m3

	Hospitalizações por doenças respiratórias evitadas anualmente		Mortes prematuras evitadas anualmente
	idades 15 - 64	idade > 64	todas as idades
População	15.648.971	1.956.121	21.734.682
Casos por 100.000	0,15	4,56	1,36
Total de casos/eventos	23	89	296
Custo por caso/evento - US\$	4.720	4.720	1.450.000
Valor monetário total - US\$	110.795	421.020	428.600

Como discutido acima, o VSL é a melhor métrica para valorar as mortes prematuras evitadas. Não sofre com a limitação de "um ano" do VOLY e o valor derivado para VSL do estudo europeu referenciado pelos autores (US\$ 1,45 milhão) é baixo, mas pelo menos comparável ao dos estudos de custo / benefício dos EUA e da China para poluição do ar por veículos automotores. Os benefícios em mortalidade e morbidade tomados conjuntamente somam aproximadamente US\$ 429 milhões por ano.

Além disso, essas reduções de ozônio trazem benefícios monetários positivos relacionados a impactos econômicos no bem-estar e prejuízos materiais, tais como efeitos sobre os ecossistemas florestais e agrícolas (danos à folhagem e menor crescimento das plantas, menor rendimento das colheitas) e efeitos sobre materiais sintéticos (elastômeros, fibras têxteis e corantes e certas tintas). Mais recentemente, há uma grande preocupação com as mudanças climáticas, e a economia de combustível propiciada pelas tecnologias de controle avançado das emissões evaporativas e do controle das emissões de reabastecimento reduzirá as emissões de dióxido de carbono (CO₂) em 69.000 ton por ano na RMSP. Em geral, o valor monetário desses benefícios é difícil de quantificar. Em sua avaliação regulatória do ORVR, a EPA, dos EUA, utilizou um valor de US\$ 500 por tonelada, derivado de informações da General Motors^{47,48}. Para a RMSP, isso corresponderia ao valor de US\$ 15,6 milhões por ano. Finalmente, como comparação, é interessante notar que um estudo da Europa de 2005 analisou os danos marginais de VOC resultantes da redução do rendimento das plantações. Para os 24 países estudados, os valores variaram entre 140 - 2700 euros/ton, com um valor médio de cerca de 970 euros/ton, ou cerca de US\$ 1000/ton.

⁵ Ajustado para um milhão de Euros usando a conversão e inflação de Euro para dólar desde 2005.

E. Saúde ocupacional – postos de gasolina

A partir desse ponto, estende-se a análise da RMSP para todo o Brasil. Atualmente, o vapor de gasolina é emitido nas estações de serviço durante o reabastecimento de veículos com gasolina C. Esse vapor contém um carcinogênico humano conhecido, o benzeno. O atual limite de benzeno na composição da gasolina C é de 1%. Nas temperaturas observadas durante o reabastecimento do veículo, existem cerca de 0,0137 g de benzeno emitido por litro de combustível transferido⁴⁹. Para o Brasil, isso permite estimar um inventário de 332 ton de benzeno emitido em estações de serviço por ano. É uma quantidade pequena em comparação com o inventário total de COV, mas significativo porque o benzeno é um conhecido agente cancerígeno (leucemia) e um risco à saúde ocupacional.

Existem cerca de 41.600 postos de gasolina no Brasil⁵⁰, e estima-se que cada posto tenha cerca de oito atendentes para abastecer veículos⁵¹. Esta é uma população exposta de 332.000 pessoas em todo o país.

Existem muitos estudos sobre a exposição dos trabalhadores dos postos de gasolina ao benzeno no Brasil e em muitos países ao redor do mundo. Essa exposição é claramente um risco à saúde ocupacional. Um estudo recente no Brasil mediu exposições na zona respiratória de 47-435 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de benzeno (média de 212 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) em 10 postos de gasolina⁵².

Usando a metodologia desenvolvida pela EPA dos EUA para a avaliação do conceito ORVR⁵³, esse valor médio representa um risco individual de cerca de 2,8 chances em 10.000 de desenvolver câncer por exposição ocupacional ao benzeno ao longo da vida. Para o Brasil como nação, isso se converte em um risco de 1,33 incidências por ano ou 93 casos, com uma expectativa de vida de 70 anos.

Os profissionais de saúde pública consideram aceitável um risco de 1 em um milhão. O valor do risco para os trabalhadores dos postos de gasolina brasileiros é de 4 em um milhão, quatro vezes a taxa aceitável. Com uma eficiência de controle de 98%, o ORVR reduzirá esse risco para 0,03 incidências por ano, ou um risco de 0,08 em um milhão.

F. Co-benefícios na redução da formação de aerossóis orgânicos secundários e MP_{2,5}

Em muitas regiões do mundo, uma fração significativa de Material particulado fino (MP_{2,5}) é atribuída ao Aerossol Orgânico Secundário (AOS). A CETESB estima que 51% do MP_{2,5} na RMSP sejam atribuídos ao aerossol secundário⁵⁴. AOS é formado a partir da oxidação atmosférica das emissões de COV na fase gasosa, na presença de luz solar e oxidantes fotoquímicos. As fontes de AOS podem ser os COVs biogênicos emitidos naturalmente da vegetação e os COVs antropogênicos emitidos por atividades humanas, como vapores de combustível. Estudos publicados mostraram que os vapores de combustível contribuem para a formação de AOS e que o potencial de formação de AOS, ou o “rendimento de AOS” de um combustível, geralmente cresce com o aumento do conteúdo aromático do combustível^{55,56}.

^t O rendimento de AOS é definido como a razão entre a massa de aerossol orgânico formada e a massa reagida de hidrocarboneto original (por exemplo, vapor de combustível).

Estudos de modelagem antigos relatavam um rendimento de AOS substancialmente baixo (0,0024) para emissões de gasolina evaporada (não de escapamento)⁵⁷; no entanto, estudos laboratoriais experimentais recentes realizados pela Universidade da Califórnia em Riverside relatam um rendimento de AOS significativamente maior, de 0,055 a partir da foto-oxidação do vapor de gasolina na presença de NOx⁵⁸. Esse rendimento de 0,055 para o AOS, representativo da gasolina de inverno E10 do sul da Califórnia, foi consistente entre os fabricantes de combustíveis e os números de octano (poder antidetonante do combustível) e foi impulsionado pelo conteúdo aromático da gasolina. Conforme discutido na Seção A, a Gasolina C do Brasil é uma mistura com conteúdo de etanol mais alto que a E10 usada na Califórnia, portanto um rendimento de AOS de 0,055 pode ser considerado um limite superior conservador para a Gasolina C no Brasil. Não seria de esperar que o E100 Brasileiro tivesse contribuições significativas de AOS.

Conforme mostrado na Seção D, as tecnologias de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento reduzirão o inventário de VOC da RMSP em 31.196 toneladas por ano. O rendimento de AOS de 0,055 obtido experimentalmente para vapor de gasolina, pode resultar em uma redução anual potencial de AOS/MP_{2,5} da ordem de 702 toneladas na RMSP. Este valor representa 37% do total de MP de fontes estacionárias e móveis estimado pela CETESB para a RMSP^u. Qualquer redução no AOS/MP_{2,5} é um co-benefício importante para as reduções de ozônio já discutidas, pois os benefícios de saúde, bem-estar e a redução dos prejuízos físicos associados a quaisquer reduções no MP_{2,5} são significativos. Por exemplo, o estudo de Abe e Miraglia, mencionado acima para o ozônio, também sugeriu que, se São Paulo pudesse diminuir o MP_{2,5} em 5µg/m³, cerca de 1725 mortes prematuras seriam evitadas anualmente, e a população ganharia mais de 5 meses em expectativa de vida, resultando em um ganho de US\$ 4,96 bilhões. Embora seja necessário realizar uma análise de modelagem da qualidade do ar mais significativa e abrangente para quantificar totalmente o benefício das reduções de VOC no AOS/MP_{2,5} na RMSP, é bastante claro que co-benefícios adicionais e potencialmente significativos certamente serão obtidos.

Conclusões:

Seja a gasolina C ou E100, as emissões por evaporação e reabastecimento de veículos são a fonte mais significativa de precursores de ozônio no Brasil. Os requisitos do PRONCONVE L7 trarão o desenvolvimento e a instalação de sistemas de controle integrado de emissões evaporativas e de reabastecimento no veículo. O valor dos vapores de combustível recuperados devido ao controle das emissões evaporativas e de reabastecimento, excederá em 2,6 vezes o custo dos sistemas instalados no veículo. A relação custo-benefício do controle avançado de emissões evaporativas e do controle de emissões do reabastecimento tomados conjuntamente resultará em uma economia de US\$ 750 por tonelada de vapores emitidos, o que representa economia e não um custo para o consumidor.

^u Calculado a partir dos dados das Tabelas 13 e 15 da referência 54. Fontes estacionárias de MP estimadas em 3.570 toneladas por ano e fontes móveis de MP estimadas em 1240 toneladas por ano, totalizando 4810 toneladas por ano. Observe que essas estimativas não incluem AOS, mas apenas as fontes primárias de MP.

As reduções de emissão de COV devidas ao controle avançado de emissões evaporativas e ao controle de emissões do reabastecimento diminuirão o inventário de COVs em 49% na RMSP e isso levará a reduções de cerca de 50% nas concentrações médias e máximas de ozônio na RMSP. A conformidade com o padrão de qualidade do ar de 140 µg/m³ de ozônio será atingida em São Paulo e em outras áreas urbanas. As reduções devidas a essas tecnologias proporcionarão um progresso significativo em direção à meta futura de 100 µg/m³, sem acrescentar nenhum ônus regulatório significativo às montadoras e sem exigir maiores recursos do governo para certificação ou supervisão.

Essas reduções nas concentrações ambientais de ozônio reduzirão as visitas aos pronto socorros e internações hospitalares motivadas por problemas respiratórios causados pela exposição ao ozônio, além de mortes prematuras. A economia nos custos relacionados à saúde é de cerca de US\$ 429 milhões por ano. Além disso, haverá benefícios de bem-estar na redução de prejuízos materiais relacionados às reduções de ozônio e de CO₂ no valor de US\$ 15,6 milhões por ano. A relação benefício/custo total é de 37:1, usando a abordagem VSL para valorar uma morte prematura evitada. Este valor não inclui a economia de combustíveis, de US\$ 46,6 milhões. Além disso, existem co-benefícios para a saúde, o bem-estar e a redução de prejuízos materiais associados às reduções de AOS/MP_{2,5} e uma diminuição nas incidências de câncer causadas pelas exposições ao vapor de gasolina C e benzeno dos atendentes dos postos de gasolina, que não foram monetizados neste estudo.

Com uma relação custo-efetividade que reflete uma economia monetária líquida e benefícios à saúde pública, bem-estar e redução de prejuízos materiais que excedem os custos em um fator de 37, os requisitos de implantação de controle avançado de emissões evaporativas e de reabastecimento representam uma excelente política econômica e ambiental.

Referências bibliográficas

¹ “Regulatory Assessment of PROCONVE L7 Improved Evaporative Emission Control Requirements for Light Vehicles, Cost-Effectiveness and Cost/Benefit,” June 2020.

² “Regulatory Assessment of PROCONVE L7 Refueling Emission Control Requirements for Light Vehicles Cost-Effectiveness and Cost/Benefit,” April 2020.

³ RANP 38-2009 at <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2009/dezembro&item=ranp-38--2009>.

⁴ “A Study of Uncontrolled Automotive Refueling Emissions,” prepared by Automotive Testing

Laboratories, Inc., Coordinating Research Council, VE-6, January 5, 1988 and US EPA, AP-42, Chapter 5, section 5.2 Transportation and Marketing of Petroleum Liquids, Table 5.2.7.

⁵ SAE Technical Paper 720931, “An Investigation of Passenger Car Refueling Losses,” Malcolm Smith, 1972.

⁶ SAE Technical Paper 860086, “Composition of Vapor Emitted from a Vehicle Gasoline Tank During Refueling” Robert L. Furey, 1986.

⁷ 17 CCR 94700: “Maximum Incremental Reactivity Values for Compounds - 2010,” California Air Resources Board.

⁸ Ted R. Aulich, Xinming He, Ames A. Grisanti, and Curtis L. Knudson, (1994), “Gasoline Evaporation—Ethanol and Nonethanol Blends,” *Air & Waste*, 44:8, 1004-1009.

-
- ⁹ The headspace value for E25 was derived from SAE Technical Paper 2007-01-4006, “A Model for Estimating Vapor Pressures of Commingled Ethanol Fuels,” Sam R. Reddy, 2007.
- ¹⁰ “Ethanol Use in Brazil: Air Quality Impacts,” Energy and Environmental Science, 2009, p. 1025.
- ¹¹ “Determining VOCs Reactivity for Ozone Forming Potential in the Megacity of São Paulo,” Aerosol and Air Quality Research, 18, 2018, p. 2472.
- ¹² “Determining VOCs Reactivity for Ozone Forming Potential in the Megacity of São Paulo,” Aerosol and Air Quality Research, 18, 2018, p. 2465.
- ¹³ “Ethanol Use in Brazil: Air Quality Impacts,” Energy and Environmental Science, 2009, p. 1031 and “Determining VOCs Reactivity for Ozone Forming Potential in the Megacity of São Paulo.” Aerosol and Air Quality Research, 18, 2018, p. 2464.
- ¹⁴ “Ethanol Use in Brazil: Air Quality Impacts,” Energy and Environmental Science, 2009, p. 1030.
- ¹⁵ “Ozone Precursors for the São Paulo Metropolitan Area,” Science of the Total Environment, 408, p.1619, 2010.
- ¹⁶ “Main Ozone Forming VOCs in the City of São Paulo: Observations, Modelling, and Impacts,” Air Quality and Atmospheric Health, 10:421, 2017.
- ¹⁷ “Determining VOCs Reactivity for Ozone Forming Potential in the Megacity of São Paulo.” Aerosol and Air Quality Research, 18, 2018.
- ¹⁸ CETESB – “Emissões Veiculares no Estado de São Paulo” – 2018 Appendix X p. 167 – Series Relatorios.
- ¹⁹ SAE Technical Paper 2017-01-5008, “Summary and Analysis of 2000-2015 Model Year IUVP Evaporative and Refueling Emission Data” Glenn W. Passavant, 2017.
- ²⁰ “Review of the European Test Procedure for Evaporative Emissions: Main Issues and Proposed Solutions,” European Commission, Joint Research Center, 2012.
- ²¹ SAE Technical Paper 2017-01-5008, “Summary and Analysis of 2000-2015 Model Year IUVP Evaporative and Refueling Emission Data” Glenn W. Passavant, 2017.
- ²² “Morbidity Costs Associated with Ambient Air Pollution Exposure in São Paulo, Brazil,” Atmospheric Pollution Research 2, 520-529, 2011.
- ²³ US EPA, <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>
- ²⁴ “An Evaluation of Air Pollution Health Impacts and Costs in São Paulo, Brazil,” Environmental Management, Vol. 35, No. 5, pp. 667-676.
- ²⁵ ExternE, Externalities of Energy Methodology, 2005 Update, IERE, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2005.
- ²⁶ US Department of Agriculture, <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/raleigh-nc/plant-science-research/docs/climate-changeair-quality-laboratory/ozone-effects-on-plants/>
- ²⁷ Relatório de frota por município atualizado em tempo real - DENATRAN - <http://internet.detran.to.gov.br/Estatistica/Frota/FrotaMunicipio.asp>.
- ²⁸ Branco, G.M. e Branco, F.C. - Estudo da Distribuição de Combustíveis nos Municípios Brasileiros Afetados pela Poluição Veicular – XIII SIMEA - Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 2005.
- ²⁹ IHS Markit, Mobility and Energy Future, Rivalry, 2019
- ³⁰ “QUALIDADE DO AR NO ESTADO DE SÃO PAULO 2018,” Tabela 15, CETESB, São Paulo, 2019.
- ³¹ “EMISSÕES VEICULARES 2018,” Tabela 11, CETESB, São Paulo.
- ³² “QUALIDADE DO AR NO ESTADO DE SÃO PAULO 2018,” Tabela 11, CETESB, São Paulo, 2019.
- ³³ “QUALAR - SISTEMA DE INFORMAÇÕES DA QUALIDADE DO AR,” 2018 resultados, CETESB, São Paulo.
- ³⁴ “QUALIDADE DO AR NO ESTADO DE SÃO PAULO 2018,” pp.17-18, CETESB, São Paulo, 2019.

-
- ³⁵ "QUALAR - SISTEMA DE INFORMAÇÕES DA QUALIDADE DO AR," CETESB, São Paulo.
- ³⁶ "Ozone Precursors for the São Paulo Metropolitan Area," *Science of the Total Environment*, 408, pp. 1612-1620, 2010.
- ³⁷ Main Ozone-Forming VOCs in the City of São Paulo: Observations, Modeling, and Impacts," *Air Quality, Atmosphere, and Health*, 10, pp. 421-435, 2017.
- ³⁸ "Determining VOCs Reactivity for Ozone Forming Potential in the Megacity of São Paulo," *Aerosol and Air Quality Research*, 18, pp. 2460-2474, 2018.
- ³⁹ "QUALAR - SISTEMA DE INFORMAÇÕES DA QUALIDADE DO AR," 2018 resultados, CETESB, São Paulo.
- ⁴⁰ "QUALIDADE DO AR NO ESTADO DE SÃO PAULO 2018," pp. 102-103, CETESB, São Paulo, 2019.
- ⁴¹ CETESB, *Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2018 – Série Relatórios*.
- ⁴² "Health Impact Assessment of Air Pollution in São Paulo Brazil," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13, 694, 2016.
- ⁴³ ExternE, *Externalities of Energy Methodology, 2005 Update*, IERE, Office for Official Publications of the European Communities, pp. 146-147, Luxembourg, 2005.
- ⁴⁴ "Air Quality Standards and Extreme Ozone Events in the São Paulo Megacity," *Sustainability*, 2019, 11, 3725.
- ⁴⁵ "Cost-benefit Assessment of Proposed China 6 Emission Standard for New Light-duty Vehicles", Working Paper 2017-06, p.11, International Council on Clean Transportation.
- ⁴⁶ "Control of Air Pollution from Motor Vehicles: Tier 3 Motor Vehicle Emission and Fuel Standards Final Rule, Regulatory Impact Analysis," p.8-30, U.S. EPA, March 2014.
- ⁴⁷ "Public Hearing on the EPA Study of Gasoline Volatility and Hydrocarbon Emissions from Motor Vehicles," Ann Arbor, MI., February 4-5.1986. {Public Docket No. A-85-21, Entry II-F-1.
- ⁴⁸ US EPA, "Final Regulatory Impact Analysis: Refueling Emission Regulations for Light Duty Vehicles and Trucks and Heavy Duty Vehicles," EPA 420/R-94/007, January 1994.
- ⁴⁹ "Vehicle Refueling Emissions - Refueling Emission Inventories and Regulatory Policy," Glenn W. Passavant, US EPA Emissions Inventory Conference, Baltimore, MD, August 2017.
- ⁵⁰ ANP <http://www.anp.gov.br/postos/consulta.asp>.
- ⁵¹ "Use of Personal Protective Equipment by Gas Station Workers: A Nursing Contribution," *Text Context Nursing*, Florianopolis, 2014, Jan-Mar 23(1), pp.193-202.
- ⁵² "Assessment of BTEX Concentrations in Air Ambient of Gas Stations Using Passive Sampling and the Health Risks for Workers," *Journal of Environmental Protection*, 2017, 8, pp. 12-25.
- ⁵³ US EPA, "Draft Regulatory Impact Analysis: Proposed Refueling Emission Regulations for Gasoline-Fueled Motor Vehicles Volume I," EPA 450/3-87-001a, July 1987. Appendix H.
- ⁵⁴ "QUALIDADE DO AR NO ESTADO DE SÃO PAULO 2018," CETESB, São Paulo, 2019.
- ⁵⁵ "Secondary Organic Aerosol Formation from Photo-Oxidation of Unburned Fuel: Experimental Results and Implications for Aerosol Formation from Combustion Sources," *E, S, &T*, 47, 12886-12893, 2013.
- ⁵⁶ "The Atmospheric Aerosol-Forming Potential of Whole Gasoline Vapor," *SCIENCE*, 276, 96-99, 1997.
- ⁵⁷ "Elucidating Secondary Organic Aerosol from Diesel and Gasoline Vehicles through Detailed Characterization of Organic Carbon Emissions," *PNAS*, 109, 45, 18318-18323, 2012.
- ⁵⁸ "Secondary Organic Aerosol and Ozone Formation from Photo-Oxidation of Anthropogenic Compounds and Mixtures Under Relevant Atmospheric Environment", UC Riverside Electronic Theses and Dissertations, Chapter 6, 2018. <https://escholarship.org/uc/item/5bk5d29k>.