

Estimativa da Redução de Emissões na Região Metropolitana de São Paulo pela Introdução de Transportes Alternativos Limpos¹

Gheisa Roberta Telles Esteves²

Ennio Peres da Silva³

Sonia Regina da Cal Seixas Barbosa⁴

Resumo

A produção em massa de veículos ocorre atualmente resulta em um aumento crescente do consumo de combustíveis fósseis. Sabe-se que não é só ela a responsável por tal aumento. No entanto, possui parcela significativa de responsabilidade. Tais veículos fazem uso intensivo de derivados de petróleo causando severos problemas ambientais devido às emissões de poluentes e gases de efeito estufa nos grandes centros urbanos do mundo. Portanto, o presente artigo propõe traçar cenários de emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo - RMSP para o período compreendido entre 2006 e 2025. Como alternativa a atual composição frota veicular da RMSP, o artigo apresenta possíveis cenários de introdução de veículos movidos com células a combustível. O cálculo das emissões foi realizado com metodologia que vem sendo utilizada pela CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, para o seu cálculo do inventário de emissões veiculares. Para que possam ser calculadas as emissões veiculares na localidade foram efetuadas projeções da frota veicular da RMSP, seguindo método direto e indireto. No estudo pode-se concluir que a continuidade das reduções de emissões da frota depende muito mais da melhoria na tecnologia dos combustíveis, do que da introdução de uma parcela de veículos novos limpos, visto que seus resultados tardariam muito tempo para serem alcançados.

1. Introdução

Vive-se num contexto onde se perpetua o antropocentrismo, onde o ser humano se coloca em uma posição de “ator principal”⁵ perante o meio ambiente, não se considerando parte integrante do mesmo. Por tal razão, o ser humano degrada e destrói a natureza, seja através do uso de combustíveis fósseis, seja pelo tratamento inadequado dos resíduos (sólidos, líquidos ou gasosos), ou pelo desmatamento de áreas de floresta.

No entanto, o ser humano tal como os outros seres do planeta, faz parte de uma espécie, e tudo que ocorre no meio ambiente onde ele está inserido tem efeitos, sejam eles positivos ou negativos, sobre todos os que ali habitam, inclusive sobre ele mesmo.

Para que o homem compreenda que ele faz parte do meio onde vive, e que as ações e decisões por ele tomadas podem ter contornos devastadores, faz-se necessário

¹ O presente artigo é parte integrante da Tese de Doutorado intitulada Estimativas de Redução do Custo da Saúde Pública da Cidade de São Paulo, desenvolvida no Programa de Planejamento de Sistemas Energéticos, FEM/UNICAMP.

² Doutora do Programa de Planejamento de Sistemas Energéticos, FEM/UNICAMP.

³ Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos; Coordenador do Laboratório de Hidrogênio/Instituto de Física/UNICAMP; Co-orientador da Tese de Doutorado.

⁴ Doutora em Ciências Sociais; Pesquisadora do Núcleo de estudos e Pesquisas Ambientais - NEPAM/UNICAMP; Professora credenciada do Programa de Planejamento de Sistemas Energéticos, FEM/UNICAMP; Orientadora da Tese de Doutorado.

⁵ Ator principal visto que o ser humano vê o que acontece com o meio ambiente como se não fosse também um ator desse processo, e que a sua permanência no planeta não depende do equilíbrio dele. Em verdade, a atuação do ser humano tem papel decisivo no equilíbrio do meio ambiente.

uma mudança de postura, buscar uma nova modernidade, um novo estilo de desenvolvimento que seja, não só ambientalmente sustentável, mas também socialmente, culturalmente e politicamente sustentável (Guimarães, 1998).

Com base no exposto nos parágrafos acima, o presente artigo, primeiramente, caracteriza o problema da poluição atmosférica apresentando suas principais fontes de emissão para a RMSP. Como o foco do estudo são as emissões veiculares são analisadas as atuais tecnologias utilizadas nos veículos e seus respectivos gases poluentes. A fim de visualizar a questão da poluição do ar na RMSP é feita uma caracterização da atual frota licenciada na região. Como o objetivo do estudo é o cálculo das emissões veiculares em diferentes cenários de composição da frota, são apresentadas as tanto as metodologias de projeção quanto a metodologia de cálculo das emissões veiculares, bem como os cenários de composição da frota para o ano de 2025.

2. Fontes de Poluição do Ar na Região Metropolitana de São Paulo – RMSP

A organização espacial da RMSP, seja com relação à circulação das fontes móveis ou a disposição das fontes estacionárias, juntamente com a topografia e as condições climáticas da região são os fatores determinantes da qualidade do ar (CETESB, 2004). Aliado a isso, está também o próprio processo de desenvolvimento urbano ocorrido na região a partir dos anos 50, processo esse que acabou por ocasionar a formação de uma ilha de calor na região (Carmo, 1995; CETESB, 2005).

A região possui uma frota de 7,3 milhões de veículos (2006), sendo eles 1/5 da frota nacional, além de cerca de 2000 industriais ali localizadas (CETESB, 2006). Sabe-se que 65% da frota é composta por veículos a gasolina, 12,3% veículos a álcool e 6,1% da frota é do tipo “*flex-fuel*”. O álcool correspondente a 47,54% de todo combustível consumido. A seguir será caracterizado o problema das emissões veiculares e das emissões industriais na região estudada.

2.2 Emissões Industriais

A poluição atmosférica por fontes estacionárias é ocasionada pelo aumento da produção industrial e também através da geração de energia – acontecimentos intrínsecos ao processo de urbanização (Araújo, 2002).

Atualmente, as atividades industriais da RMSP se encontram dispersas por toda a região. Essa distribuição pode ser explicada pelo deslocamento da produção industrial, antes localizada somente na cidade de São Paulo, para seu entorno⁶ (Tartaglia & Oliveira, 1988; Geo, 2004). Esse fenômeno é denominado processo de desconcentração industrial, e é característico da evolução histórica e geográfica do Estado de São Paulo (Geo, 2004).

O grande problema na região, atualmente, são as emissões veiculares e não mais as emissões industriais, como ocorrido algumas décadas atrás. As medidas de controle dos poluentes industriais, principalmente do material particulado e do dióxido de enxofre, tiveram conseqüências bastante satisfatórias, estando agora em avançado estágio de controle (CETESB, 2004).

2.3 Emissões Veiculares

Na RMSP, as emissões veiculares desempenham papel chave na análise da qualidade do ar, visto que os veículos foram responsáveis no ano de 2005 por 97% das emissões de monóxido de carbono (CO), 97% das emissões de hidrocarbonetos (HC), 96% das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), 40% das emissões de material particulado (MP) e 35% das emissões de óxidos de enxofre (SO_x) (CETESB, 2006). Além disso, aproximadamente 78% da poluição do ar é proveniente dos veículos que circulam diariamente na região⁷ (Hogan, 2000). Dentre os fatores que contribuem para o agravamento da poluição atmosférica podem ser citadas as características da atual frota circulante, que possui 53,3% deles com idade superior a 10 anos (CETESB, 2006), a falta de manutenção periódica e adequada e a má qualidade dos combustíveis usados nos veículos.

Em estudo realizado por Martins (2002) foi verificado que as mais altas concentrações de ozônio na cidade de São Paulo ocorrem no meio da manhã e no meio da tarde, ambos períodos de *rush*⁸. Foi constatado também que nos horários de tráfego intenso ocorrem elevações da poluição do ar por monóxido de carbono nos pontos da cidade onde se encontram as mais intensas circulações e concentrações da frota de veículos.

3. Tecnologias Utilizadas nos Veículos e Gases Poluentes

Os veículos produzidos pela indústria automobilística mundial são predominantemente compostos por motores que seguem dois ciclos: o ciclo de Otto e o ciclo Diesel (Alvarez, 2002).

Os motores que utilizam o ciclo Otto são movidos à gasolina, álcool ou gás. A reação de combustão nesse tipo de motor se dá por centelha. Os gases poluentes principais emitidos na reação em tais motores são o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC); óxidos de nitrogênio (NO_x), e aldeídos (CHO). No caso dos veículos movidos à gasolina, ainda ocorre a emissão de material particulado (PM) e óxidos de enxofre (SO_x). Vale mencionar que os atuais veículos *flex-fuel* também utilizam o referido ciclo.

Nos motores que utilizam o ciclo Diesel, a combustão se dá pela compressão da união do ar com o combustível dentro dos cilindros. Os poluentes principais emitidos por esse processo são o material particulado (MP), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os óxidos de enxofre (SO_x).

4. Características da Frota Licenciada na RMSP

Para o ano de 2006, conclui-se que a frota da RMSP é composta em sua grande maioria por automóveis correspondendo 76%. Observa-se na Figura 1, que os ônibus representam uma pequena parcela da frota licenciada em ambas às localidades. No

⁶ Para o ABC Paulista (Santo André, São Bernardo e São Caetano), Cubatão, e para Região Metropolitana de Campinas.

⁷ E esse percentual pode facilmente estar sendo sub-estimado tendo em vista que no cálculo das emissões veiculares somente são levados em consideração os veículos licenciados na RMSP, não tendo variáveis que considerem o fluxo de entrada e saída diário existente na região.

⁸ Tráfego intenso.

entanto, é preciso considerar que mesmo estando em menor quantidade, tal parcela da frota tende a circular muito mais durante o dia do que os automóveis.

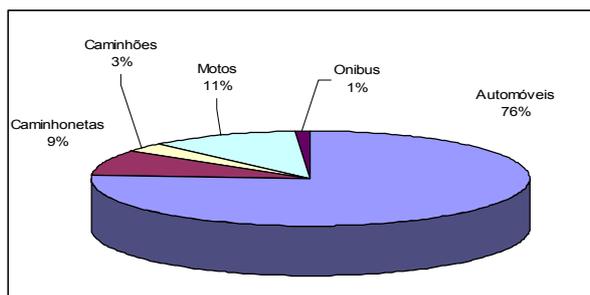


Figura 1 – Composição da Frota Licenciada na RMSP – 2006
Fonte: Elaboração Própria a partir de Dados Prodesp (2007).

Dos automóveis licenciados, aproximadamente 78% são movidos a gasolina (Figuras 2). Os veículos *flex-fuel* já representam 7,32% da frota circulante e 78% dos novos veículos licenciados na RMSP no ano de 2006 são bi-combustível (DETRAN/PRODESP, 2007).

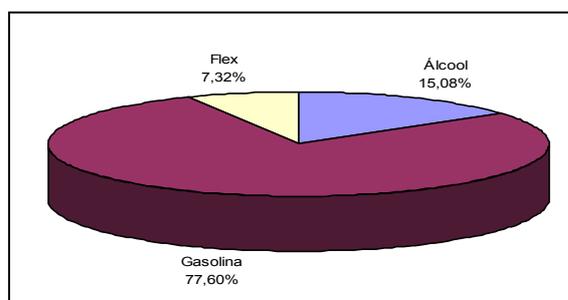


Figura 2 – Composição da Frota de Automóveis da RMSP – 2006
Fonte: Elaboração Própria a partir de Dados Prodesp (2007).

No que diz respeito ao combustível utilizado pelo total da frota licenciada, a gasolina responde por aproximadamente 73% dos veículos (Figuras 3). Apesar de uma pequena mudança na configuração do licenciamento de veículos, os veículos a gasolina ainda são os que compõem boa parte da frota licenciada. Os veículos bi-combustível já representam aproximadamente 7% dos veículos, isso representa um aumento do consumo de álcool e também de gasolina, visto que na literatura considera-se que tais veículos circulam 40% do tempo com álcool e 60% do tempo com gasolina. É preciso ser mencionado que o PRODESP/ DETRAN não separa na sua classificação dos veículos licenciados os veículos convertidos para gás natural veicular.

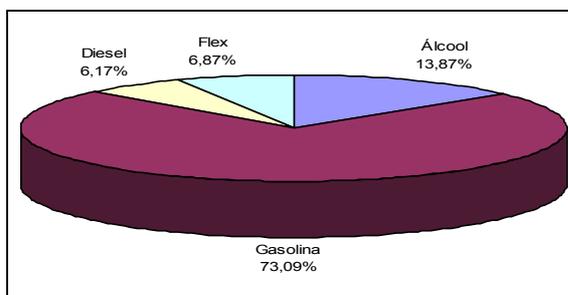


Figura 3 – Combustível Utilizado pela Frota Licenciada da RMSP – 2006
Fonte: Elaboração Própria a partir de Dados Prodesp (2007).

Quanto aos anos de vida da frota, 97% dos veículos a álcool possuem 10 anos ou mais de uso. No caso dos veículos a gasolina, em torno de 52% dos veículos a gasolina tem mais de 10 anos. Nos veículos a diesel ocorre o mesmo fato, tendo 57% dos veículos mais de 10 anos. Somente os veículos bi-combustíveis possuem muito poucos veículos com menos de 10 anos, por ser uma tecnologia relativamente recente.

Nas Tabelas 1 a 5 encontram-se as emissões dos diversos poluentes pelas fontes móveis licenciados na RMSP durante o período de 2001 a 2005. Pode-se observar que, de acordo com os cálculos efetuados pela CETESB, as emissões de monóxido de carbono tiveram uma redução de aproximadamente 5% ao longo do período. Os táxis foram as fontes que apresentaram maior redução (48,65), e os veículos movidos a álcool e *flex fuel* as menores (10%)

Tabela 1 – Estimativa de Emissão de Monóxido de Carbono pelas Fontes Móveis na RMSP

Fonte de Emissão		Emissão de Monóxido de Carbono (CO)				
		2001	2002	2003	2004	2005
Tubo de Escapamento dos Veículos	Gasolina C	780,8	790,2	818,2	811,4	667,1
	Álcool+Flex	207,5	211,5	217,9	217,8	186,4
	Diesel	433,5	444,4	456,3	413,5	363,7
	Taxi	3,5	2,3	2,4	2,2	1,8
	Motocicleta e Similares	217,5	238,9	262	261,2	245,4
Total		3.644	3.689	3.760	3.710	3.469

t*1000/ano

O hidrocarboneto também apresentou uma redução de 4% no período analisado, como pode ser observado na Tabela 2; no entanto, algumas fontes apresentaram crescimento nas emissões. No caso das emissões pelo tubo de escapamento os táxis foram os veículos que apresentaram maior aumentos nas emissões (43%), e nas emissões do cárter e evaporativa as motocicletas e similares foram as que apresentaram as maiores taxas (35%). Nas emissões pelo tubo de escapamento os veículos a diesel apresentaram as maiores reduções (19%) e nas emissões do cárter e evaporativa, os veículos a álcool apresentaram reduções de 18% nas emissões.

Tabela 2 – Estimativa de Emissão de Hidrocarbonetos pelas Fontes Móveis na RMSP

Fonte de Emissão		Emissão de Hidrocarbonetos (HC)				
		2001	2002	2003	2004	2005
Tubo de Escapamento dos Veículos	Gasolina C	82,5	84,2	84,1	83,2	83,2
	Álcool+Flex	23,1	22,9	23,6	23,6	20,1
	Diesel	70,6	72,4	74,3	65,7	57,3
	Taxi	0,7	0,5	0,5	0,4	1
	Motocicleta e Similares	28,7	31,5	34,6	34,4	32,6
Cárter e Evaporativa	Gasolina C	131,6	134,1	138,3	135,4	124,6
	Álcool	17,3	17,2	16,9	17,4	14,2
	Motocicleta e Similares	15,5	17	18,6	20,3	20,9
Pneus	Todos os Tipos	-	-	-	-	-
Operações de Transferência de Combustível	Gasolina C	12,6	12,4	11,6	11,6	13,5
	Álcool	0,4	0,6	0,5	0,5	1
Total		383	392,8	403	392,5	368,4

t*1000/ano

Fonte: CETESB (2005)

As emissões de óxido de nitrogênio apresentaram reduções de 16%, aproximadamente. Os veículos a diesel foram os que apresentaram maior redução das emissões pelo tubo de escapamento.

Tabela 3 – Estimativa de Emissão de Óxidos de Nitrogênio pelas Fontes Móveis na RMSP

Fonte de Emissão		Emissão de Óxidos de Nitrogênio (NOx)				
		2001	2002	2003	2004	2005
Tubo de Escapamento dos Veículos	Gasolina C	44,4	51,8	46,7	45,6	41
	Álcool+Flex	12,7	12,6	13,1	13,1	11
	Diesel	316,5	324,5	222,5	295,7	260,6
	Taxi	0,7	0,7	0,6	0,5	2,1
	Motocicleta e Similares	1,1	1,2	1,3	1,6	1,8
Total		375,4	390,8	284,2	356,5	316,5

t*1000/ano

Fonte: CETESB (2005)

Na Tabela 4 estão apresentadas as estimativas de emissões dos óxidos de enxofre pelas fontes moveis licenciadas na RMSP. De todos os poluentes até então analisados, o óxido de enxofre foi que teve maior redução nas emissões. As reduções no período estudado foram de 45,3%. Todas as fontes apresentaram grandes reduções, sendo a das motocicletas e similares as de maior magnitude (50%).

Tabela 4 – Estimativa de Emissão de Óxidos de Enxofre pelas Fontes Móveis na RMSP

Fonte de Emissão		Emissão de Óxidos de Enxofre (SOx)				
		2001	2002	2003	2004	2005
Tubo de Escapamento do Veículos	Gasolina C	10,2	9,1	8	8,1	6,2
	Álcool+Flex	-	-	-	-	-
	Diesel	10,9	11,2	11,5	11,9	5,6
	Taxi	0,4	0,3	-	-	-
	Motocicleta e Similares	0,8	0,5	0,5	0,5	0,4
Total		22,3	21,1	20	20,5	12,2

t*1000/ano

Fonte: CETESB (2005)

Diferente de todos os outros poluentes analisados, o material particulado apresentou um aumento em suas emissões da ordem de 28,8%. Somente os automóveis licenciados movidos a Gasolina C apresentaram reduções nas emissões (2%), e os veículos a diesel foram os que apresentaram as maiores taxas de crescimento no período (41,7%). É preciso ser dito que o MP₁₀ corresponde a uma parcela de todo o material particulado emitido por tais fontes.

Nos próximos itens serão apresentadas as metodologias de projeção da frota de automóveis (bem como os respectivos resultados para cada uma delas), e a metodologia utilizada para o cálculo das emissões.

Tabela 5 – Estimativa de Emissão de Material Particulado pelas Fontes Móveis na RMSP

Fonte de Emissão		Emissão de Material Particulado				
		2001	2002	2003	2004	2005
Tubo de Escapamento do Veículos	Gasolina C	5,1	5,2	5,3	5,4	5
	Álcool+Flex	-	-	-	-	-
	Diesel	13,9	16,4	20,3	20,2	19,7
	Taxi	0,2	0,1	0,1	0,1	-
	Motocicleta e Similares	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8
Total		19,8	22,3	26,4	26,4	25,5

t*1000/ano

Fonte: CETESB (2005)

5. Metodologia de Projeção da Frota de Automóveis

As projeções de frota podem ser efetuadas seguindo duas metodologias; a dos cenários tendenciais e dos cenários específicos. Os cenários tendenciais supõem que não houve nenhuma modificação no perfil de aquisição e utilização dos veículos, mantendo, portanto, a tendência verificada no período considerado. Já no cenário específico são feitas suposições específicas, baseadas em hipóteses verificadas ou vislumbradas, direta ou indiretamente; todas elas relacionadas com o setor de transporte, e capazes de modificar significativamente o perfil da frota de veículos.

As projeções da frota da RMSP foram efetuadas seguindo somente metodologias de cenários tendenciais, a primeira seguindo um método direto e a segunda seguindo um método indireto. No método direto se estabelece uma função (equação) do número de veículos licenciados anualmente, e então se projeta esta função para que sejam obtidos valores para anos a frente.

A qualidade de tais projeções tem relação proporcional com a qualidade do ajuste da função escolhida. No entanto, não somente a qualidade do ajuste deve ser levada em consideração, mas também a qualidade das projeções efetuadas por cada uma das funções testadas. A qualidade do ajuste é avaliada pelo R^2 da função e a qualidade das projeções será analisada pelo cálculo da frota licenciada no ano de 2025.

No método indireto faz-se uso de algum parâmetro que possua relação com o número de veículos em circulação. Os parâmetros mais utilizados são o índice de motorização ou índice de veículos por PIB. No caso da presente tese o parâmetro utilizado será o índice de motorização. Nesse caso, são necessários dados da frota licenciada anualmente além dos dados do parâmetro utilizado. A equação matemática que descreve a forma como o índice de motorização por 100 habitantes.

Tal como no caso da metodologia direta, também se faz necessária uma avaliação da qualidade das projeções realizadas, não só dos valores do índice de motorização, mas também dos valores obtidos para a frota circulante.

6. Projeção da Frota de Automóveis – Método Direto

O primeiro passo para a projeção de dados de frota de uma determinada localidade é a disponibilidade de dados históricos que possam caracterizar o comportamento da frota durante certo período de tempo. Os dados históricos disponíveis foram fornecidos pelo DETRAN/PRODESP para o período compreendido de 1996 a 2004. Na Figura 5 encontram-se os dados de evolução da frota da RMSP.

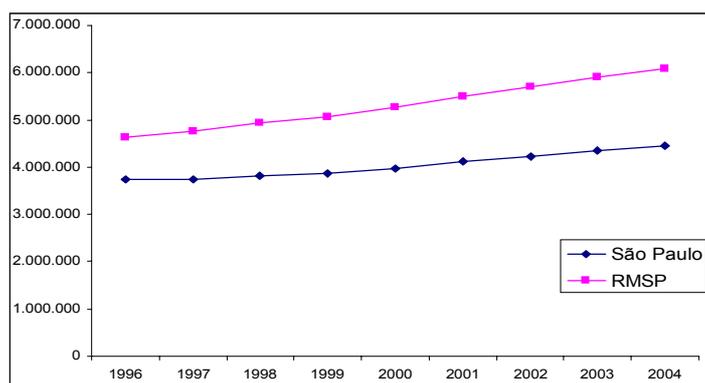


Figura 5 – Evolução da Frota de Veículos da Cidade e RMSP
Fonte: DETRAN/PRODESP (2005).

No método direto, inicia-se a projeção da frota pela busca de uma função que ajuste os dados. Através de uma curva de ajuste é possível obter diversas funções de ajuste, buscando-se a escolha da melhor delas. No caso a qualidade do ajuste é, num primeiro momento, analisada pela função de R^2 . No entanto, nem sempre um ótimo ajuste significa que aquela função também seja a melhor para uma análise prospectiva ou retrospectiva. Muitas vezes funções bem ajustadas podem acabar levando a valores fora da realidade. Baseado nisso, foi também feita uma análise não só quantitativa, mas também qualitativa das funções, através do cálculo de valores previstos para a frota no ano de 2025.

As projeções obtidas com os polinômios de ordem 2, 3, 4 e 5 resultaram em valores bastante improváveis, caso se analise o resultado no que tange a população projetada pela Fundação SEADE para o ano de 2025. Para a RMSP a população projetada seria de 22.600.000 habitantes. Não é plausível supor que o índice de motorização, que para o ano de 2004 é 32,3 irá crescer em 20 anos mais de 10 vezes. Portanto, as funções polinomiais serão todas desconsideradas. Das funções restantes (exponencial, logarítmica e linear) vê-se que a exponencial é a que possui maior precisão (R^2). Nesse caso o índice de motorização previsto para 2025 seria de 56,2 para a RMSP. Tal cenário será considerado otimista.

Tabela 7 – Funções de Ajuste para a RMSP

Função	R2	Frota 2025
Linear	0,99471	9.969.304
Logarítmica	0,87061	6.627.783
Exponencial	0,997831	12.703.104
Polinomial ordem 2	0,99858	13.137.846
Polinomial ordem 3	0,99929	-2.489.399
Polinomial ordem 4	0,99291	-602.222.368
Polinomial ordem 5	0,99955	828.545.116

7. Projeção da Frota de Automóveis – Método Indireto

No método indireto, utiliza-se um parâmetro que possua alguma relação com o número de veículos em circulação. Na presente tese, o parâmetro utilizado foi o índice de motorização. Na Tabela 8 está mostrado o índice de motorização calculado a partir dos dados de população e frota de veículos.

Tabela 8 – Frota de Veículos da RMSP

Ano	Número de Veículos	População	Índice de Motorização
1996	4.629.868	16.562.227	27,95
1997	4.765.563	16.792.329	28,38
1998	4.935.837	17.051.559	28,95
1999	5.068.141	17.517.230	28,93
2000	5.266.419	17.807.926	29,57
2001	5.499.427	18.095.851	30,39
2002	5.692.198	18.345.032	31,03
2003	5.896.003	18.600.384	31,70
2004	6.088.176	18.862.115	32,28

Fonte: DETRAN/PRODESP (2005); SEADE (2007).

Observando a Tabela 8 pode-se notar que o índice de motorização nos últimos 2 anos estabilizou-se entre 32 veículos para cada 100 habitantes para a RMSP. Nesse momento, dois caminhos podem ser seguidos: o primeiro deles seria obter uma curva de crescimento do índice e projetá-lo até o ano de 2025. Caso tal caminho seja seguido, se alcançaria um segundo cenário otimista visto que o índice projetado para o ano de 2025 seria superior ao obtido pelo método direto. O segundo caminho a ser seguido seria o da utilização de projeções populacionais para o cálculo do número de veículos. As projeções populacionais utilizadas para o cálculo foram obtidas com a Fundação Sistema Estaduais de Análise de Dados – SEADE, sendo os valores projetados para a população nos anos de 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2015, 2020 e 2025⁹. Os dados intermediários (período de 2010 e 2025) foram obtidos por interpolação. Para o cálculo do número de veículos da frota foi mantido o índice de motorização do último ano de referência, no caso o ano de 2004. Os resultados da projeção da frota de veículos para ambos os métodos podem ser comparados na Figura 6.

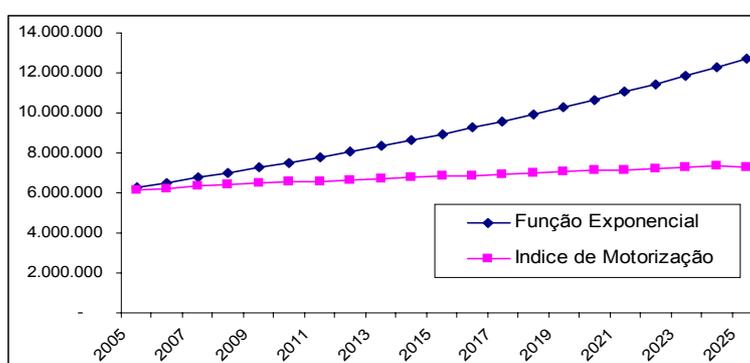


Figura 6 – Frota de Veículos da RMSP Paulo Projetada de 2005 a 2025

8. Metodologia de Cálculo das Emissões Veiculares

Existem, atualmente, duas metodologias de cálculo das emissões veiculares, a metodologia do *bottom-up* e a do *top-down*; a diferença entre elas está na forma de se agregar os dados. Na metodologia do *bottom-up*, utilizada no cálculo das emissões pela CETESB no Inventário de Qualidade do Ar, calculam-se as emissões levando em consideração todos os gases, de acordo com o tipo de equipamento empregado e seus respectivos rendimentos. Na metodologia *top-down*, também conhecida como abordagem de referência, leva-se em conta apenas as emissões de dióxido de carbono

⁹ <http://www.seade.gov.br/cgi-bin/wxis?IsisScript=anuario/anuario.xis>.

obtidas a partir dos dados de produção e consumo de energia, sem a preocupação de como essa energia é consumida (Mattos, 2001).

Na presente tese, a metodologia utilizada é a *bottom-up*. A função matemática, a partir da qual se obtém o valor das emissões pelo tubo de escapamento dos automóveis, estabelece a relação entre a idade do veículo, a quilometragem percorrida pelo mesmo no decorrer de um ano¹⁰ e o fator de emissão de cada categoria veicular. A equação abaixo descreve o cálculo da quantidade de poluentes emitida.

$$E_F = N * KM * FE_F \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

E_F : Emissão do poluente considerado para a frota (g/ano);

N : Número de veículos que compõem a frota da localidade em questão;

KM : Quilometragem média anual (km);

FE_F : Fator de emissão da frota para o poluente de interesse (g/km).

Caso se deseje calcular os valores de emissão em 1.000t/ano, é necessário fazer o seguinte cálculo:

$$E_F = FE_F * KM * N * 10^{-9} \quad (\text{Eq.2})$$

O cálculo das emissões será efetuado para os dados da frota licenciada¹¹ projetada do ano de 2006 ao ano de 2025 para a RMSP. É preciso enfatizar que o valor das emissões obtido com base nos dados fornecidos pelo Detran/SP podem estar subestimados, visto que os veículos que circulam diariamente na região metropolitana não são somente os veículos que se encontram ali licenciados, circulam também veículos licenciados no interior do estado, existindo, por isso, um fluxo diário de entrada e saída de veículos. Ou seja, existe uma transferência de poluentes provenientes de outras cidades para a RMSP.

Algumas outras questões metodológicas precisam ser mencionadas:

- Para a frota de veículos *flex-fuel*, foi considerado que ao longo de 1 ano, tais veículos circularão 60% de sua quilometragem anual com gasolina e 40% com álcool.
- Também para os veículos *flex-fuel*, foi considerado que a partir de 2009 todos os veículos novos utilizarão tal tecnologia. O percentual de introdução de tais veículos na frota nova para o ano de 2007 foi de 80% e em 2008 de 90%. Para os anos anteriores a 2007 foram considerados os percentuais obtidos a partir dos dados fornecidos pelo DETRAN/PRODESP.
- No cálculo das emissões de SO_x, para os veículos *flex-fuel*, foi considerada somente a quilometragem média anual percorrida com gasolina.
- Os veículos novos introduzidos na frota após 2006 terão os fatores de emissão constantes, sendo seu aumento de emissão influenciado somente pelo fator de deterioração.

¹⁰ Em média um veículo novo percorre 22.000 km ao longo de um ano (Mattos, 2001).

¹¹ Frota licenciada pelo Detran/SP (Departamento de Transito de São Paulo).

9. Cenários de Introdução da Frota de Veículos com Células a Combustível

Os quatro cenários estão descritos a seguir:

- Cenário Tendencial - cenário “sem CaC”, um cenário tendencial, não tendo ocorrido nesse cenário nenhuma modificação nos veículos de combustão interna, permanecendo a tendência atual. Como mencionado acima, o cenário tendencial servirá de base para o desenvolvimento dos cenários alternativos.
- Cenário Alternativo I - cenário para introdução de novas tecnologias. Serão introduzidos veículos com células a combustível em substituição ao veículo de combustão interna. Os índices de introdução serão os propostos para a cidade de Los Angeles (Califórnia). Os índices de introdução podem ser observados na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9 - Número mínimo de veículos ZEV* após modificações em 2007

Modelo	Mínimo ZEV Requerido
2009 – 2017	11%
2018 - posteriores	16%

*Veículo de Emissão Zero.

Fonte: CARB, 2007.

- Cenário Alternativo II – cenário também de introdução de veículos com células à combustível, no entanto, com metas mais próximas da realidade da RMSP. O percentual de veículos a ser introduzido foi obtido através de uma adaptação do percentual de introdução utilizado no cenário alternativo I. Tal adaptação consiste em corrigir o percentual de introdução dos veículos com um fator que mede a razão entre o PIB (para o ano 2003) da Região Metropolitana de Los Angeles e da Região Metropolitana de São Paulo. Os índices de introdução adaptados para a realidade das duas localidades estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Número mínimo de veículos ZEV* após Adaptação para a Realidade da RMSP

Modelo	Mínimo ZEV Requerido
2009 – 2017	2%
2018 - posteriores	3%

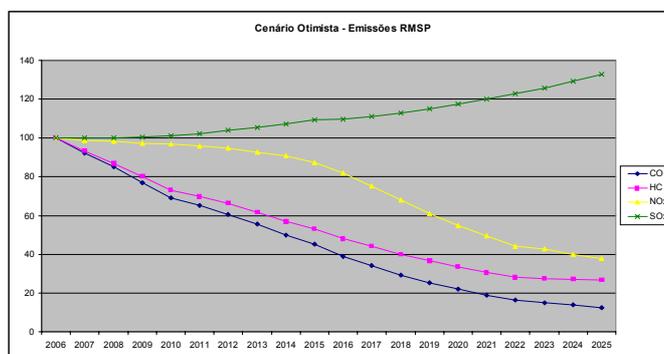
Fonte: CARB, 2007.

- Cenário Alternativo III – seria o cenário considerado ideal do ponto de vista exclusivamente ambiental, onde todos os veículos leves novos introduzidos seriam veículos movidos com células a combustível.

10. Emissões da Frota de Automóveis na RMSP

Foram calculadas as emissões para os quatro cenários de introdução da frota de veículos novos e para as duas frotas projetadas (otimista e pessimista). Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as emissões de todos poluentes para a RMSP, no cenário BAU.

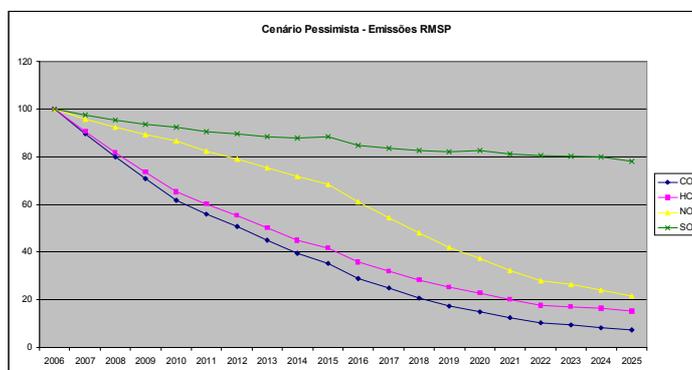
Figura 7 – Emissões no Cenário BAU – Frota Otimista RMSP (Índice Base Fixa = 2006)



Observando os resultados obtidos para ambos os cenários pode-se concluir que o poluente que apresentou maior redução percentual foi o monóxido de carbono, seguido pelos óxidos de nitrogênio. Especialmente para o monóxido de carbono grandes reduções no fator médio de emissão dos automóveis ocorridas nos últimos 10 anos, ainda estarão presentes na frota em 2025, visto que em tal frota ainda teremos veículos com ano-modelo de 1995. Com isso, pode-se supor que somente após de 2036 poderão começar a ser observados aumentos nas emissões dos poluentes, e em especial no caso do monóxido de carbono.

No cenário pessimista, as reduções percentuais são superiores as do cenário otimista, e isso ocorre em grande parte porque quando se calcula os fatores emissão de determinado poluente, são levados em consideração o tamanho da frota e sua quilometragem média anual. Como no cenário otimista tanto as frotas projetadas como as quilometragens médias anuais são maiores do que no cenário pessimista é de se esperar que as reduções nas emissões sejam mais modestas também.

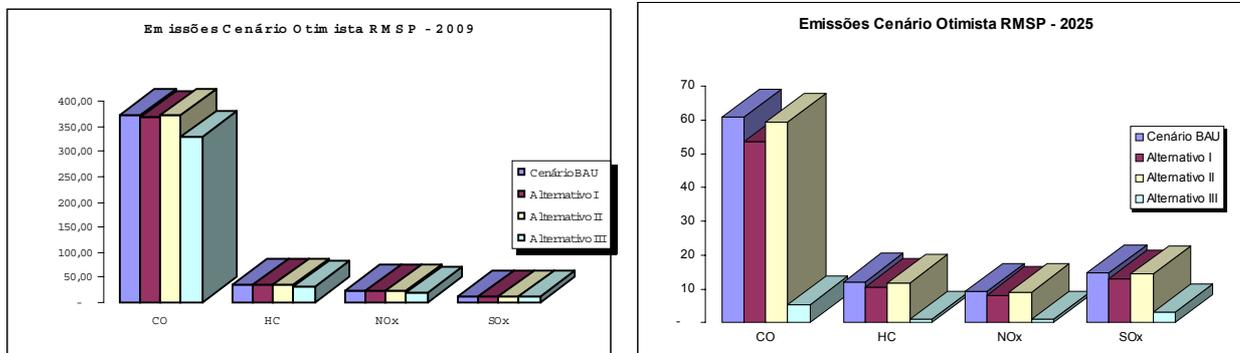
Figura 8 – Emissões no Cenário BAU – Frota Pessimista RMSP (Índice Base Fixa = 2006)



No caso específico do óxido de enxofre nos cenários BAU calculados para a RMSP (apresentados nas Figuras 7 e 8) foram observados resultados distintos dependendo da projeção da frota analisado. Nas projeções otimistas das frotas de automóveis, as emissões de óxido de enxofre apresentaram aumentos consideráveis, enquanto nas projeções pessimistas foram observadas reduções. Tal diferença pode ser explicada pela projeção da frota e pela forma como é calculado o fator de emissão do poluente. Como pode ser observado na Equação 36, o fator de emissão do SOx é o mesmo para toda frota, independente do seu ano-modelo, e nenhum fator de deterioração é adicionado a esse fator. O fator médio de emissão calculado a partir dos dados foi de 0,1444. Para as emissões de CO, NOx e HC existem fatores médios de emissão disponíveis para cada ano-modelo, e são também empregados fatores de deterioração (CO, NOx e HC), o que pode resultar em reduções nas emissões tanto por reduções nos fatores de emissão (ou seja, na tecnologia empregada nos veículos) quanto pelo volume da frota de automóveis.

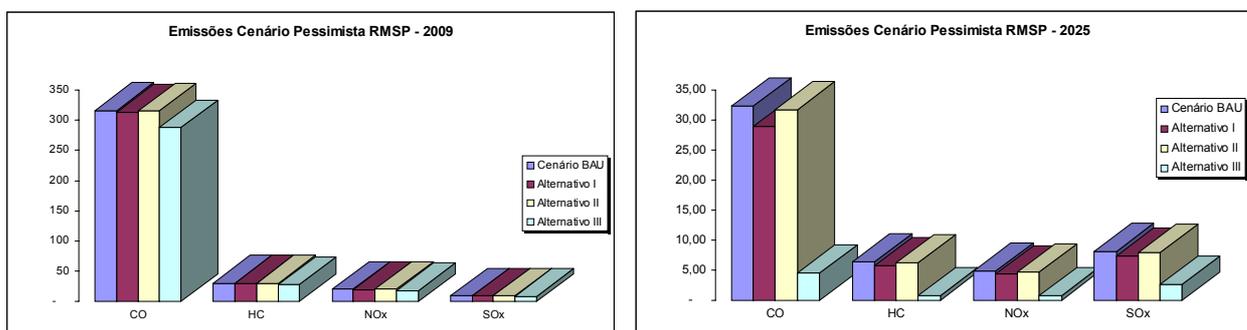
Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas a evolução das emissões de todos os poluentes dos quatro cenários para as projeções otimistas e pessimistas da frota da RMSP. Comparando as emissões dos quatro cenários no ano de 2009 (ano de início das mudanças de composição da frota de automóveis novos) com o ano de 2025, têm-se fortes reduções nas emissões em todos os cenários. As reduções mais significativas ocorrem no cenário Alternativo III, dado que nele todos os automóveis introduzidos na frota são movidos com célula combustível, tendo assim uma maior renovação da frota com veículos limpos.

Figura 9 – Emissões nos Quatro Cenários– Frota Otimista 2009 e 2025 - RMSP (1000 t/ano)



No caso da diferença entre as emissões, pode-se constatar tanto nas projeções otimistas quanto nas pessimistas que nos cenários a mudança da composição da frota, ocasiona uma mudança também na relação das emissões dos diferentes poluentes entre si. Por exemplo, no ano de 2009 na Figura 5.11, o maior volume de emissão era do CO seguido do HC, o NOx e o SOx. Já no ano de 2025, apesar do maior volume de emissão continuar sendo do CO, as emissões de SOx passam a ter maior representatividade quando comparadas com as emissões de HC e NOx.

Figura 10 – Emissões nos Quatro Cenários– Frota Pessimista 2009 e 2025 - RMSP (1000 t/ano)



Analisando a relação das emissões dos poluentes entre os cenários, tem-se que o volume emitido de CO no cenário Alternativo III, independente do tipo de projeção aplicado é consideravelmente inferior as emissões de HC, NOx e SOx em todos os outros cenários estudados.

11. Conclusões

Em função dos resultados obtidos ao longo do artigo podemos concluir que:

- Com relação as projeções da frota licenciada de automóveis da RMSP foram calculadas frotas otimistas e pessimistas para ambas as localidades tendo. As frotas otimistas foram calculadas por funções exponenciais e as pessimistas pelo índice de motorização.
- As reduções de emissão de CO, HC e NOx reduziram e ainda estão reduzindo no cenário tendencial devido a melhoria na tecnologia dos motores ocorridas nos últimos 20 anos. As emissões de SOx por dependerem de melhoria do combustível não vislumbraram tal redução.
- Foram calculadas as emissões de CO, HC, NOx e SOx da frota licenciada de automóveis nas duas localidades nos quatro cenários. Para as emissões de CO, HC e NOx foram observadas reduções nas emissões em todos os cenários. Os cenários otimistas apresentam reduções percentuais superiores as dos cenários pessimistas. As emissões de CO foram as que tiveram as maiores reduções.
- Para o caso específico das emissões de SOx, nos cenários otimistas, as emissões apresentaram crescimento, enquanto nos cenários pessimistas ocorreram reduções. Isto pode ser explicado pelo crescimento da frota e pela forma como é calculado o fator de emissão do poluente, visto que ele é um fator fixo independente do ano-modelo do veículo. O que ocasiona tal aumento no cenário otimista é o fato da frota estar crescendo a taxas

superiores ao decréscimo da quilometragem média anual. No caso dos cenários pessimistas, a taxa de crescimento da frota é inferior a taxa de decréscimo da quilometragem média anual.

- O volume de CO emitido no Cenário Alternativo III tem taxas inferiores as das emissões de HC, NOx e SOx, independente do cenário analisado.
- Caso nada seja alterado na composição e tendência de crescimento da frota das duas localidades, as emissões de CO, HC e NOx continuarão em processo de redução. Em especial o CO, apresentou grandes reduções no seu fator médio de emissão nos últimos 10 anos, reduções essas que ainda estarão causando efeitos no ano de 2025, dado que nesta frota ainda teremos automóveis ano/modelo de 1995.
- Existe a necessidade não só da introdução de veículos novos limpos na frota para redução das emissões. É preciso também melhorar a qualidade das emissões dos veículos antigos. Isto pode ser obtido através da melhoria dos combustíveis.
- Tais tecnologias limpas precisam ser introduzidas o mais rápido possível, pois seus impactos tardam de 30 a 40 anos para ocorrer.

12. Referências Bibliográficas

- Albán, S. A., Durán, A.R. *Programa de Control de Fuentes Móviles, Región Metropolitana, Chile*. MIT. Fiscalización. Subsecretaría de Transportes. Abril 2000.
- Alvarez Jr., O. M., Lacava, C. I. V., Fernandes, P.S. *Emissões Atmosféricas*. Brasília: SENAI/DN, 2002. 373p.
- Araújo, Paula Duarte. *Impactos Ambientais e na Matriz de Consumo de Combustíveis pela Introdução de uma Frota de Veículos Leves com Células a Combustível na Cidade de São Paulo – SP*. São Paulo: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004, 145p. Tese (Mestrado).
- Azuanga, Denise. *Danos Ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil*. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000, 126p. Tese (Doutorado).
- Bajay, S. V. et al. Demanda de Combustíveis da Frota de Veículos Leves no Brasil até 2015. In: *XI Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro*. 2006, pp.521-533.
- CARB. Status Report on the Californian Air Resources Board's Zero Emission Vehicle Program. *ZEV Technology Review*. California: 2007. 26p.
- CETESB. *Inventário de emissão veicular: metodologia de cálculo*. 1999.
- CETESB, Dados Fornecidos pelo DETRAN/PRODESP. São Paulo: 2005.
- CETESB. *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo*. São Paulo: Gráfica CETESB, 2007. 90p.
- CETESB. *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo*. São Paulo: Gráfica CETESB, 2006. 90p.
- DETRAN/PRODESP (Departamento de Análises). *Arquivo: Frota Circulante – 2003*, São Paulo, 2004.

Esteves, Gheisa Roberta Telles. *Estimativa de Redução de Custo da Saúde Pública da Cidade de São Paulo*. São Paulo: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 157p. Tese (Doutorado).