



**EMISSÕES DE GASES FLUORADOS CAUSADORES DE EFEITO ESTUFA:
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA O BRASIL ATÉ 2050**

Otto Hebeda

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Roberto Schaeffer

Joana Portugal-Pereira

Rio de Janeiro

Junho de 2017

EMISSÕES DE GASES FLUORADOS CAUSADORES DE EFEITO ESTUFA:
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA O BRASIL ATÉ 2050

Otto Hebeda

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.

Profa. Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2017

Hebeda, Otto

Emissões de gases fluorados causadores de efeito estufa: desenvolvimento e análise de cenários para o Brasil até 2050 / Otto Hebeda. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XXI, 171.: il.; 29,7 cm.

Orientador (es): Roberto Schaeffer

Joana Portugal-Pereira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 162-169.

1. Gases Fluorados. 2. Protocolo de Montreal. 3. Mudanças Climáticas. I. Schaeffer, Roberto *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

*“A obra em si mesma é tudo: se te agradar, fino leitor, pago-me da tarefa; se te
não agradar, pago-te com um piparote, e adeus.”*

– Machado de Assis

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Joana Portugal Pereira e Roberto Schaeffer, pela atenção e esforço em me guiar ao longo desse árduo caminho.

Aos professores André Lucena e Bettina Hoffman, por terem aceitado em contribuir com este trabalho fazendo parte da banca de avaliação, muito obrigado.

Aos meus pais, pelo amor e suporte incondicional.

À Isabela Tagomori, minha namorada, pela paciência, carinho e estímulo.

Agradeço também aos meus colegas do Programa de Planejamento Energético, em especial Heliz Menezes e Lucas Pinho, pela companhia nestes últimos anos.

Aos meus amigos da vida, Matheus Chatack, Julia Guerra, Thais Carvalho e Marianne Zotin por sempre estarem dispostos a ouvir as minhas reclamações da vida.

Aos funcionários do PPE, pela disposição e atenção em resolver os inúmeros problemas burocráticos desta UFRJ. E pelos cafés.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**EMISSÕES DE GASES FLUORADOS CAUSADORES DE EFEITO ESTUFA:
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA O BRASIL ATÉ 2050**

Otto Hebeda

Junho/2017

Orientadores: Roberto Schaeffer

Joana Portugal Pereira

Programa: Planejamento Energético

Gases fluorados são fluidos de elevado potencial de aquecimento global. Embora, atualmente, inferiores a 2% ao ano, em CO₂eq, as emissões totais globais destes compostos vêm crescendo acentuadamente nos últimos anos. Este estudo tem como objetivo elaborar cenários de projeção de emissões brasileiras de gases fluorados causadores de efeito estufa (HFCs, PFCs e SF₆) até 2050 e avaliar potenciais e custos da implementação de diferentes opções de mitigação. Para o cenário que prevê maior crescimento econômico, estima-se que, em 2050, as emissões destes compostos fluorados sejam mais de 12 vezes superiores ao valor observado em 2015, atingindo um total de 111.569 GgCO₂eq. Em linhas gerais, os equipamentos de ar condicionado foram aqueles que apresentaram maior contribuição para o total de emissões no período de 2015 a 2050 (84%). A implementação de medidas de abatimento é capaz de reduzir até 95% das emissões totais neste período. Em 2050, a custos negativos, é possível abater 37% de todas as emissões, e com custos inferiores a 20 M€/GgCO₂eq é possível abater 97% do total de emissões.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FLUORINATED GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN BRAZIL: DEVELOPMENT
AND ANALYSIS OF SCENARIOS UP TO 2050

Otto Hebeda

June/2017

Advisors: Roberto Schaeffer

Joana Portugal Pereira

Department: Energy Planning

Fluorinated gases are fluids with high global warming potential. Although, presently less than 2% a year, the total global emissions of these compounds have been growing sharply in the last years. This study aims to elaborate scenarios for fluorinated greenhouse gas (HFC, PFC and SF₆) emissions in Brazil up to 2050, and to evaluate potentials and costs of implementing different mitigation options. For the scenario considering the highest economic growth, it is estimated that, in 2050, the emissions of fluorinated gases will be more than 12 times higher than the value observed in 2015, reaching a total of 111,569 GgCO₂eq. In general, air conditioning equipments that presented the greatest contribution to the total emissions between 2015 and 2050 (84%). The implementation of abatement measures is capable of reducing up to 95% of total emissions in this period. In 2050, at negative costs, it is possible to cut 37% of all emissions, and cost lower than 20 M€/GgCO₂eq, it is possible to cut 97% of all emissions.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Dos clorofluorcarbonos aos hidrofluorcarbonos	1
1.2 Evolução das Emissões de Gases Fluorados no Mundo	4
1.2.1 HFCs	5
1.2.2 SF ₆ e PFCs	7
1.3 Acordos para redução de emissões de gases fluorados causadores de efeito estufa	12
1.4 Participação das emissões de gases fluorados em cenários de baixo carbono	19
1.5 Objetivos deste Estudo	20
1.6 Estrutura de Desenvolvimento do Estudo	20
2. Gases Fluorados e Fontes de Emissão	22
2.1 Gases Fluorados Contemplados	22
2.2 Fontes de Emissão de Gases Fluorados	23
2.2.1 Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado	23
2.2.2 Equipamentos Elétricos (Emissões de SF ₆)	28
2.2.3 Produção de Magnésio (Emissão de SF ₆)	28
2.2.4 Produção de HCFC-22 (ou R-22) (Emissão de R-23)	29
2.2.5 Produção de Alumínio (Emissão de PFCs).....	30
2.2.6 Indústria de semicondutores	30
2.2.7 Outras fontes de emissão de HFCs	32
2.2.8 Outras fontes de emissão de hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	33
3. Emissões Brasileiras de Compostos Fluorados	34
3.1 Produção de HCFC-22: Emissões de HFC-23	34
3.2 Setor de Refrigeração e Ar Condicionado	35
3.2.1 Caracterização do Setor de Refrigeração e Ar Condicionado	35

3.2.2	Emissões do Setor de Refrigeração e Ar Condicionado	45
3.3	Equipamentos Elétricos e Produção de Magnésio	48
3.4	Indústria de alumínio	49
4.	Metodologia	52
4.1	Cálculo de Emissões de gases fluorados	52
4.2	Cálculo do custo de mitigação	54
4.3	Dados e premissas macroeconômicas	62
4.4	Refrigeração doméstica	71
4.5	Refrigeração comercial	76
4.6	Ar condicionado domiciliar	77
4.7	Ar condicionado comercial	81
4.8	Ar condicionado veicular	83
4.9	Bebedouro	89
4.10	Outros usos de HFCs	89
4.11	SF ₆ em equipamentos de distribuição e transmissão elétrica	90
4.12	Produção de alumínio	91
4.13	Cenários de mitigação	93
5.	Resultados e Discussões	96
5.1	Refrigeração Doméstica	96
5.2	Refrigeração comercial	105
5.3	Ar condicionado residencial	111
5.4	Ar condicionado comercial	116
5.5	Ar condicionado Veicular	121
5.6	Produção de alumínio	143
5.7	Setor elétrico	144
5.8	Emissões totais de gases fluorados no Brasil até 2050	145

6. Considerações finais	159
Referências Bibliográficas	162
Anexo I	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transição global do consumo de CFCs para HFCs e HCFCs.....	2
Figura 2. Emissões de gases fluorados no período 2005-2050	5
Figura 3. Consumo global de HFCs para o período de 2000-2050.....	6
Figura 4. Projeções das emissões de HFCs por fonte.....	7
Figura 5. Emissões de SF ₆ em equipamentos elétricos 1990-2030	8
Figura 6. Emissões de SF ₆ na produção de magnésio no período de 1990-2030	9
Figura 7. Projeção das emissões dos gases PFCs provenientes da produção de alumínio até 2030	10
Figura 8. Emissões de gases fluorados (PFCs, SF ₆ e NF ₃) na indústria de semicondutores	11
Figura 9. Emissões de gases fluorados (PFCs, SF ₆ e NF ₃) na indústria de monitores de tela plana	12
Figura 10. Diagrama de um ciclo de refrigeração de compressão a vapor.....	23
Figura 11. Evolução da carga de HFC-134a total contida em novos refrigeradores domésticos entre 1990 e 2010.....	36
Figura 12. Carga de refrigerante fluorado nos equipamentos de refrigeração comercial (1997-2010)	37
Figura 13. Carga de HFC-134a contida nos novos aparelhos de ar condicionado em automóveis e veículos leves entre 1996 e 2010.....	39
Figura 14. Carga de HFC-134a em novos ônibus licenciados por ano entre 1996 e 2010.....	40
Figura 15. Evolução da carga de HFCs em novos caminhões frigoríficos licenciados no Brasil	41
Figura 16. Evolução da carga de HFC-134a em chillers entre 1995 e 2010	42
Figura 17. Fluxograma simplificado da metodologia de cálculo das emissões de gases fluorados em equipamentos de refrigeração e ar condicionado.	52
Figura 18. Pessoas por residência no Brasil entre 1994 e 2012	65
Figura 19. População e relação habitante/domicílio no Brasil para o período 2010 a 2050	66
Figura 20. Taxa de urbanização brasileira para o período entre 1940 e 2050.....	68
Figura 21. Acesso dos domicílios brasileiros a eletricidade entre 1990 e 2013.....	69

Figura 22. Valores do PIB brasileiro entre 1948 e 2015 (em reais de 2015)	69
Figura 23. Desenvolvimento do PIB brasileiro entre 2015 e 2050.	71
Figura 24. Curva de sucateamento de geladeiras e <i>freezers</i>	75
Figura 25. Licenciamento de novos veículos em território nacional entre 1962 e 2015	84
Figura 26 Licenciamento de veículos novos entre 1962-2016 no Brasil: (A) automóveis; (B) comerciais leves; (C) Caminhões; (D) Ônibus.....	85
Figura 27. Curva de sucateamento para Automóveis e Comerciais leves.....	86
Figura 28. Percentual de automóveis, comerciais leves e caminhões com ar condicionado entre 1990 e 2020	87
Figura 29. Percentual de ônibus urbanos licenciados com ar condicionado	88
Figura 30. Consumo de energia elétrica no Brasil entre 1990 e 2050.....	91
Figura 31. Produção de alumínio primário no Brasil entre 1990 e 2050	92
Figura 32 Posse média de geladeiras no Brasil entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B	97
Figura 33 Posse média de freezers entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B	97
Figura 34. Quantidade total de geladeiras entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B	98
Figura 35. Quantidade total de freezers entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B.	98
Figura 36. Quantidade de geladeiras vendidas para uso doméstico vendidas anualmente entre 2015 e 2050.....	99
Figura 37. Quantidade de freezers para uso doméstico vendidos anualmente entre 2015 e 2050	100
Figura 38. Emissões de HFC-134a no Cenário A (Refrigeração Doméstica)	101
Figura 39. Emissões de HFC-134a no Cenário B (Refrigeração Doméstica)	101
Figura 40. Emissões totais de refrigeração doméstica em ambos cenários de crescimento do PIB	102
Figura 41 Emissões totais e abatidas na refrigeração doméstica pelo recolhimento, substituição do fluido e ambas medidas no Cenário A.	103

Figura 42 Emissões totais e abatidas na refrigeração doméstica pelo recolhimento, substituição do fluido e ambas medidas no Cenário B.....	104
Figura 43 Vendas de equipamentos de refrigeração comercial com HFC entre 2014 e 2050 ..	105
Figura 44. Quantidade total de equipamentos de refrigeração comercial com HFC.....	106
Figura 45. Emissões totais de gases fluorados no setor de refrigeração comercial entre 1998 e 2050 no Cenário A	107
Figura 46. Emissões totais de gases fluorados no setor de refrigeração comercial entre 1998 e 2050 no Cenário B	107
Figura 47. Emissões dos equipamentos de refrigeração comercial em ambos cenários no Brasil entre 1998 e 2050	108
Figura 48. Emissões totais com medidas de controle no setor de refrigeração comercial entre 1990 e 2050 no Cenário A.....	109
Figura 49. Emissões totais com medidas de controle no setor de refrigeração comercial entre 1990 e 2050 no Cenário B.....	110
Figura 50 Posse média de ar condicionados residenciais nos dois cenários de crescimento do PIB	111
Figura 51. Quantidade total de aparelhos de ar condicionado domiciliar entre 2015 e 2050 ...	112
Figura 52. Emissões de ar condicionados domiciliares - Cenário A.....	113
Figura 53. Emissões de ar condicionados domiciliares - Cenário B	113
Figura 54. Emissões totais de ar condicionados residenciais nos dois cenários de crescimento do PIB	114
Figura 55 Emissões totais e emissões com medidas de controle- Ar Condicionado Residencial - Cenário A	115
Figura 56. Emissões totais e emissões com medidas de controle- Ar condicionado residencial - Cenário B	116
Figura 57. Área por empregado e área total do setor comercial - Cenário A.....	117
Figura 58. Área por empregado e área total do setor comercial - Cenário B	117
Figura 59. Carga total em equipamentos de ar condicionado comercial entre 2015 e 2050....	118
Figura 60. Emissões de aparelhos de ar condicionado comercial - Cenário A	119
Figura 61. Emissões de aparelhos de ar condicionado comercial - Cenário B.....	119

Figura 62. Emissões com medida de controle de aparelhos de ar condicionado comercial no Brasil - Cenário A	120
Figura 63. Emissões com medidas de controle de aparelhos de ar condicionado comercial no Brasil - Cenário B.....	121
Figura 64. Quantidade de automóveis com ar condicionado licenciados entre 2016 e 2050....	122
Figura 65. Frota de automóveis com ar condicionado	123
Figura 66. Emissões totais provenientes de ar condicionados em automóveis entre 1997 e 2050: Cenário A	124
Figura 67. Emissões totais provenientes de ar condicionados em automóveis entre 1997 e 2050: Cenário B	124
Figura 68. Emissões com medidas de controle provenientes de ar condicionados nos automóveis: Cenário A.....	125
Figura 69. Emissões com medidas de controle provenientes de ar condicionados nos automóveis: Cenário B	126
Figura 70. Comerciais leves licenciados anualmente entre 2016 e 2050 em ambos cenários de crescimento do PIB	127
Figura 71. Frota de comerciais leves com aparelho de ar condicionado entre 1996 e 2050 em ambos cenários	128
Figura 72. Emissões totais de aparelhos de ar condicionado em comerciais leves: Cenário A	129
Figura 73. Emissões totais de aparelhos de ar condicionado em comerciais leves: cenário B .	129
Figura 74. Emissões com medidas de controle em veículos comerciais leves: Cenário A	130
Figura 75. Emissões com medidas de controle em veículos comerciais leves: Cenário B	131
Figura 76. Quantidade de ônibus licenciados entre 2016 e 2050 em ambos cenários de crescimento do PIB	132
Figura 77. Frota de ônibus urbanos e rodoviários com ar condicionado: Cenário A	133
Figura 78. Frota de ônibus urbanos e rodoviários com ar condicionado entre 1996 e 2050.....	133
Figura 79. Emissões de aparelhos de ar condicionado veiculares em ônibus: Cenário A.....	134
Figura 80. Emissões de aparelhos de ar condicionado veiculares em ônibus: Cenário B	134
Figura 81. Emissões de ar condicionados com medidas de controle - Ônibus: Cenário A.....	135
Figura 82. Emissões de ar condicionados com medidas de controle - Ônibus: Cenário B	136

Figura 83. Caminhões licenciados anualmente entre 2015 e 2050.....	137
Figura 84. Frota de caminhões com ar condicionado e caminhões frigoríficos – 1996 a 2050 - Cenário A	137
Figura 85. Frota de caminhões com ar condicionado e caminhões frigoríficos – 1996 a 2050 - Cenário B	138
Figura 86. Emissões de ares condicionados em caminhões e caminhões frigoríficos: Cenário A	139
Figura 87. Emissões de ares condicionados em caminhões e caminhões frigoríficos: Cenário B	139
Figura 88. Emissões com medidas de controle em ar condicionados de caminhões: Cenário A	140
Figura 89. Emissões com medidas de controle em ar condicionados de caminhões: Cenário B	141
Figura 90. Emissões com medidas de controle em transporte refrigerado: Cenário A	142
Figura 91. Emissões com medidas de controle em transporte refrigerado: Cenário B	142
Figura 92. Emissões totais de gases fluorados na produção de alumínio primário entre 2017 e 2050.....	143
Figura 93. Emissões com abatimento de gases fluorados durante a produção de alumínio primário entre 2017 e 2050.....	144
Figura 94. Emissões de hexafluoreto de enxofre proveniente de equipamentos de transmissão e distribuição elétrica	145
Figura 95. Emissões totais de gases fluorados no Brasil entre 1990 e 2050: Cenário A	146
Figura 96. Emissões totais de gases fluorados no Brasil entre 1990 e 2050: Cenário B.....	147
Figura 97. Percentual de emissões de gases fluorados, em termos de CO ₂ eq por subsetor entre 2000 e 2050: Cenário A	149
Figura 98. Percentual de emissões de gases fluorados, em termos de CO ₂ equivalente por subsetor entre 2000 e 2050: Cenário B	149
Figura 99. Emissões de gases fluorados no Brasil com medidas de controle entre 1990 e 2050: Cenário A e B.....	151
Figura 100. Curva de abatimento das tecnologias de substituição dos gases fluorados em 2050 (Cenário A).....	155

Figura 101. Curva de abatimento das tecnologias de controle de vazamento e recolhimento em 2050 (Cenário A).....	156
Figura 102. Curva de abatimento das tecnologias da substituição de gases fluorados em 2050 (Cenário B).....	157
Figura 103. Curva de abatimento das tecnologias de controle e vazamento em 2050 (Cenário B).....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Gases de efeito estufa e valor correspondente para GWP ₁₀₀	4
Tabela 2. Redução progressiva agendada para os HFCs em países desenvolvidos e em desenvolvimento	13
Tabela 3. Regulamentações/Acordos a respeito de compostos fluorados ao redor do mundo....	16
Tabela 4. Projeção das emissões de gases de efeito estufa, fluorados inclusive em cenários de referência e baixo carbono para o Brasil em 2050	20
Tabela 5. Gases Fluorados	22
Tabela 6. Emissões de HFC-23 para o período de 1990 e 2010.....	34
Tabela 7. Parcela de aparelhos de refrigeração doméstica produzidos com HFC-134a entre 1997 e 2002.....	35
Tabela 8. Quantidade aparelhos de refrigeração comerciais vendidos no Brasil	37
Tabela 9. Fração de veículos novos com ar condicionado no período entre 1990 e 2009	38
Tabela 10. Carga de HFC-134a em novos bebedouros no Brasil entre 1997 e 2010.....	44
Tabela 11. Carga de HFC-134a utilizada em aerossóis no Brasil	45
Tabela 12. Emissões brasileiras de HFC-134a em toneladas por ano entre 1995 e 2010	46
Tabela 13. Emissões de HFC-125 no setor de refrigeração e ar condicionado brasileiro.....	47
Tabela 14. Emissões de R-143a provenientes do setor de refrigeração e ar condicionado no Brasil	48
Tabela 15. Capacidade instalada de equipamentos de energia elétrica e suas emissões de SF ₆ para o período de 1990 e 2010	49
Tabela 16. Parque industrial brasileiro e suas respectivas rotas tecnológicas.....	50
Tabela 17. Quantidade de CF ₄ e C ₂ F ₆ na emitido na produção de alumínio para tecnologias Soderberg e CWPB entre os anos de 1990 e 2010	51
Tabela 18. Fluidos refrigerantes e seus respectivos GWP ₁₀₀	53
Tabela 19. Medidas de controle para cada setor: seus custos, potenciais de redução e tempo de vida.....	56
Tabela 20. População total do Brasil, de 1990 a 2050	63
Tabela 21. Número total de residências entre 1995 e 2011.....	64

Tabela 22. Quantidade de residências estimadas entre 2011 e 2050.....	67
Tabela 23. Crescimento do PIB para o período entre 2016 e 2050. Valores em % ao ano.....	70
Tabela 24. A quantidade de equipamentos de refrigeração doméstica, geladeiras e freezer no Brasil	71
Tabela 25 Quantidade de Refrigeradores e freezers que entram no mercado nacional por ano..	74
Tabela 26 Vendas de aparelhos de refrigeração comercial no Brasil entre 1998 e 2013	76
Tabela 27 Quantidade de aparelhos de ar condicionado entre 1995 e 2013.....	78
Tabela 28. Vendas de aparelhos de ar condicionado totais e para o setor residencial.	80
Tabela 29. Percentagem de R-404a nos equipamentos de ar condicionado entre 2015 e 2040 ..	80
Tabela 30. Dados da População em Idade Ativa, Taxa de Atividade, Taxa de desemprego e a participação do setor de serviço em relação ao PIB entre o período de 1990 e 2050.	83
Tabela 31. Informações a respeito da carga, taxa de vazamento e tempo de vida de diversos veículos	89
Tabela 32. Fatores de emissão de SF6 por ano em kg/kwh entre 2000 e 2014.....	90
Tabela 33 Percentual de tecnologia utilizada na produção de alumínio primário no Brasil	92
Tabela 34 Fatores de emissão por tecnologia utilizada.....	93
Tabela 35 Datas para a implementação de substitutos de menor GWP em cada setor e o seu valor limite	94
Tabela 36. Medidas de mitigação em cada cenário e seus anos de implementação.....	95
Tabela 37. Coeficientes da função da difusão de equipamentos de refrigeração doméstica.....	96
Tabela 38 Coeficientes da função de difusão de ar condicionados residenciais.	111
Tabela 39. Elasticidade renda da demanda e o R ² de suas regressões lineares.	122
Tabela 40. Emissões brasileiras de gases de efeito estufa e gases fluorados de efeito estufa em 2050.....	152
Tabela 41. Custos de mitigação das diversas opções de refrigerante a substituir os causadores de efeito estufa e seus custos marginais de mitigação	170

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4-1. Emissões no uso	52
Equação 4-2. Emissões no sucateamento	53
Equação 4-3. Emissões no uso com medida de mitigação	53
Equação 4-4. Emissões no descarte com medida de mitigação.....	53
Equação 4-5 Custo unitário de uma tecnologia em um determinado ano	54
Equação 4-6. Custo de mitigação.....	55
Equação 4-7 Função da difusão de equipamentos de refrigeração.....	72
Equação 4-8 Função linearizada da difusão de equipamentos de refrigeração	72
Equação 4-9. Quantidade de aparelhos novos no Brasil	73
Equação 4-10 Quantidade de novos aparelhos que entram no mercado	74
Equação 4-11 Elasticidade renda da demanda	77
Equação 4-12 Função linearizada das vendas em relação a renda	77
Equação 4-13 Difusão de ar condicionados nos domicílios	78
Equação 4-14 Difusão máxima de aparelhos de ar condicionado em residências	78
Equação 4-15 Forma linearizada da equação da difusão de ar condicionados em domicílios	79
Equação 4-16. Área em m ² /empregado em função da renda <i>per capita</i>	81
Equação 4-17. Número de indivíduos que trabalham no setor comercial	82
Equação 4-18. População economicamente ativa.....	82
Equação 4-19. Frota de veículos novos.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDD – Cooling Degree Days

CFC – Clorofluorocarbono

COP – Conferência das Partes

CWPB – Center-Worked Prebake

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GWP – Global Warming Potential

HFC – Hidrofluorocarbono

HCFC – Hidroclorofluorocarbono

HFE – Hidrofluoroéters

HSS – Horizontal Stud Soderberg

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MMA – Ministério de Minas e Energia

MME – Ministério de Minas e Energia

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONU – Organização das Nações Unidas

PIA – Pesquisa Industrial Anual

PIB – Produto Interno Bruto

PFC – Perfluorocarbono

PFPB – Point Feed Prebake

PNE – Plano Nacional de Energia

PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

SNAP – Significant New Alternatives Policy

SWPB – Side-Work Prebake

UNEP – United States Environment Programme

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

USEPA – United States Environmental Protection Agency

VVS – Vertical Stud Soderberg

WLICC – World LCD Industry Cooperation Committee

WSC – Conselho Mundial de Semicondutores

GIS – Gas Insulated Switchgears

1. Introdução

1.1 Dos clorofluorcarbonos aos hidrofluorcarbonos

Na Inglaterra, no início dos anos 70, o pesquisador inglês James E. Lovelock publicou um dos primeiros artigos que reportavam concentrações de gases clorofluorcarbonos (CFCs), na época utilizados em sistemas de refrigeração e aerossóis (PARSON 2003). O primeiro destes trabalhos buscava analisar as movimentações do ar na atmosfera, uma vez que se acreditava que os CFCs eram gases inertes. Assim, seria possível compreender a maneira como os ventos se locomoviam com base na mudança de concentração do gás citado (LOVELOCK 1971). LOVELOCK (1971) também notou que a quantidade de CFCs na atmosfera era, aproximadamente, igual a toda quantidade já produzida pela indústria, indicando que o gás poderia permanecer décadas na atmosfera. Este resultado motivou Lovelock e outros pesquisadores a estudar potenciais danos de CFCs à saúde humana ou ao meio ambiente (PARSON 2003).

Mario Molina e Sherwood Rowland¹ foram os primeiros cientistas a estabelecer uma relação entre os clorofluorcarbonos e a camada de ozônio (PARSON 2003). Em 1974, com o intuito de averiguar a longevidade dos CFCs na atmosfera, descobriram que, na presença de radiação ultravioleta e acima de 25 km do nível do mar, estes gases se degradariam liberando um radical livre de cloro, que reagiria com moléculas de ozônio constituintes da chamada camada de ozônio (MOLINA & ROWLAND 1974). A partir deste momento, aumentam as discussões relativas a este grupo de gases. Com a descoberta do “buraco” na camada de ozônio² em 1985 (FARMAN ET AL. 1985), 197 países se reuniram na Áustria, na chamada Conferência de Viena, com o objetivo de criar uma cooperação, pesquisar e trocar informações a respeito dos impactos antropológicos sobre a camada de ozônio (UNEP 2016).

Embora a conferência não tenha gerado nenhuma medida concreta, ela contribuiu para que em 1987 surgisse o Protocolo de Montreal sobre as Substâncias que

¹ Mario Molina e F. Sherwood Rowland, junto com Paul J. Crutzen vieram a receber o Prêmio Nobel de química pelos seus trabalhos sobre a camada de ozônio em 1995 (NOBEL MEDIA AB 2014)

² O buraco na camada de ozônio consiste na queda acentuada da concentração de ozônio sobre a Antártida (MMA 2016c).

Destroem a Camada de Ozônio. Nesta ocasião, foi determinado que haveria a descontinuação da produção e do uso de gases que destroem a camada de ozônio, como os CFCs e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), e que em 1996 os CFCs deveriam ter sua produção eliminada, com exceção dos países em desenvolvimento que apresentassem consumo menor que 0,3 kg *per capita* por ano, para os quais o prazo seria estendido a 10 anos. Já para os HCFCs, a eliminação total deveria ocorrer no ano de 2030, com produção e consumo 99,5% menor que os níveis de 1996 já em 2020 (Peixoto *et al*, 1993). Tais obrigações estabelecidas pelo Protocolo de Montreal, levaram o Brasil a criar o Plano Nacional para Eliminação de CFCs (PNC) cujo objetivo era extinguir o consumo de CFCs, através de uma eliminação gradual, a partir de 2002 até 2010 (MMA 2016a). Com este plano, o Brasil manteve o consumo real de CFCs inferior ao limite estabelecido pelo Protocolo de Montreal em todo período supracitado, resultando em 9.276 toneladas de CFC (MMA 2014).

Com a descontinuação dos CFCs, a indústria precisou encontrar produtos substitutos. Assim, surgem no mercado os hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs) (RAVISHANKARA ET AL. 1994). Conforme os CFCs eram substituídos, o consumo de HFCs aumentou (UNEP 2011). Em um período de pouco mais de 10 anos, entre 1995 e 2012, as emissões dos hidrofluorcarbonos decuplicou (EEA 2014a). A Figura 1 apresenta a evolução do consumo de CFCs, HCFCs e HFCs em nível mundial, entre 1950 e 2010.

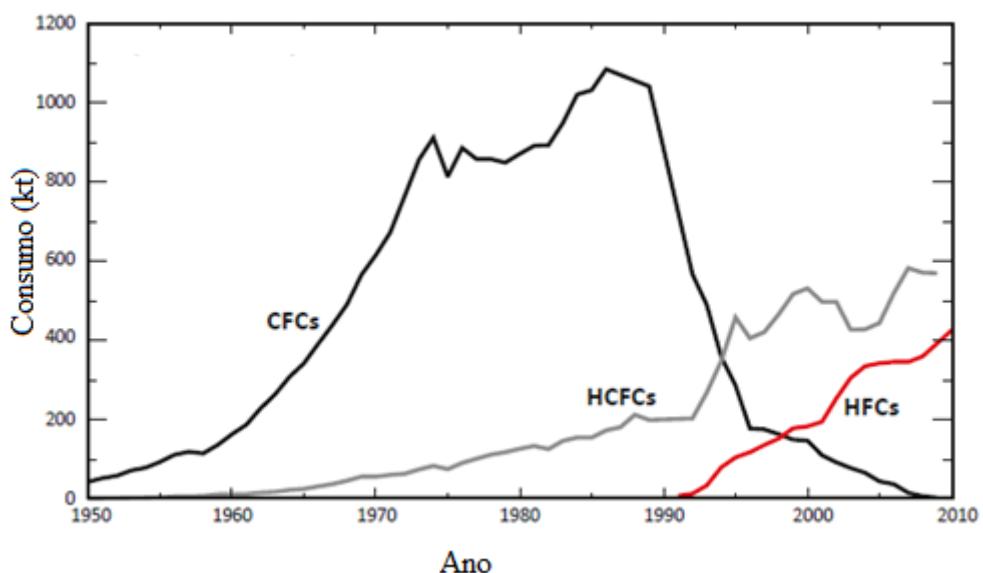


Figura 1. Transição global do consumo de CFCs para HFCs e HCFCs

Fonte: UNEP (2011)

Em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, conhecida como ECO-92, ou em inglês, *Earth Summit* (UNITED NATIONS 1997), reuniu representantes de 179 países com o objetivo de reduzir os danos antrópicos ao meio ambiente. Neste sentido, foi firmada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças do Clima (em inglês, United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC), um tratado que tinha como objetivo principal “a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera a um nível em que não ocorram interferências climáticas antropogênicas sobre o sistema climático” (UNITED NATIONS 1992).

Cinco anos após a ECO-92, no dia 11 de dezembro de 1997, na cidade de Quioto, no Japão, o Protocolo de Quioto foi introduzido a fim de complementar a UNFCCC. Este novo acordo entrou em vigor em fevereiro de 2005, e estabeleceu como objetivo reduzir as emissões de seis GEE: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de nitrogênio (N_2O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), sendo estes três últimos conhecidos também como gases de efeito estufa fluorados ou halogenados (UN 1998).

Compostos fluorados tais quais HFCs, PFCs e SF_6 são muito utilizados em refrigeração e sistemas de ar condicionado (VELDERS ET AL. 2009), e possuem elevado potencial de aquecimento global (em inglês, *Global Warming Potential – GWP*³). De maneira geral, o GWP relativo aos compostos fluorados são muito maiores frente ao potencial de aquecimento global relativo a outros gases do efeito estufa, podendo atingir até 23.500 vezes o potencial de aquecimento global relativo ao dióxido de carbono (CO_2) (MYHRE ET AL. 2013), como mostra a Tabela 1. Neste contexto, grande preocupação se coloca em relação às emissões de gases fluorados, visto que mesmo pequenas emissões podem acarretar grandes contribuições ao aquecimento global (VELDERS ET AL. 2015).

³ O potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*, em inglês) pode ser interpretado como o total de energia adicionado ao sistema climático por um componente em relação ao CO_2 ao longo de um tempo determinado. GWP_{100} é a nomenclatura indicava de um potencial de aquecimento em um horizonte de 100 anos (MYHRE ET AL. 2013).

Tabela 1. Gases de efeito estufa e valor correspondente para GWP₁₀₀

Gás	Símbolo	GWP ₁₀₀
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	28
Óxido nitroso	N ₂ O	264
Hidrofluorcarbonos	HFCs	1-10.800
Perfluorcarbonos	PFCs	1-11.100
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	23.500

Fonte: Elaboração própria com base em MYHRE ET AL. (2013)

1.2 Evolução das Emissões de Gases Fluorados no Mundo

Embora as contribuições atuais dos gases fluorados sejam de apenas 2% em relação a todas as emissões globais anuais em CO₂eq, esta parcela vem crescendo há 25 anos (EEA 2014b). Acredita-se que esta tendência deverá se manter nas próximas décadas (GSCHREY ET AL. 2011; PUROHIT & HOGLUND-ISAKSSON 2016; GSCHREY & SCHWARZ 2009), motivada pela utilização de HFCs nos sistemas de refrigeração e ar condicionado, cuja demanda tem se tornado cada vez mais expressiva, especialmente por parte dos países em desenvolvimento (USEPA 2012). A Figura 2 mostra a projeção das emissões de gases fluorados para 2050 (USEPA 2012).

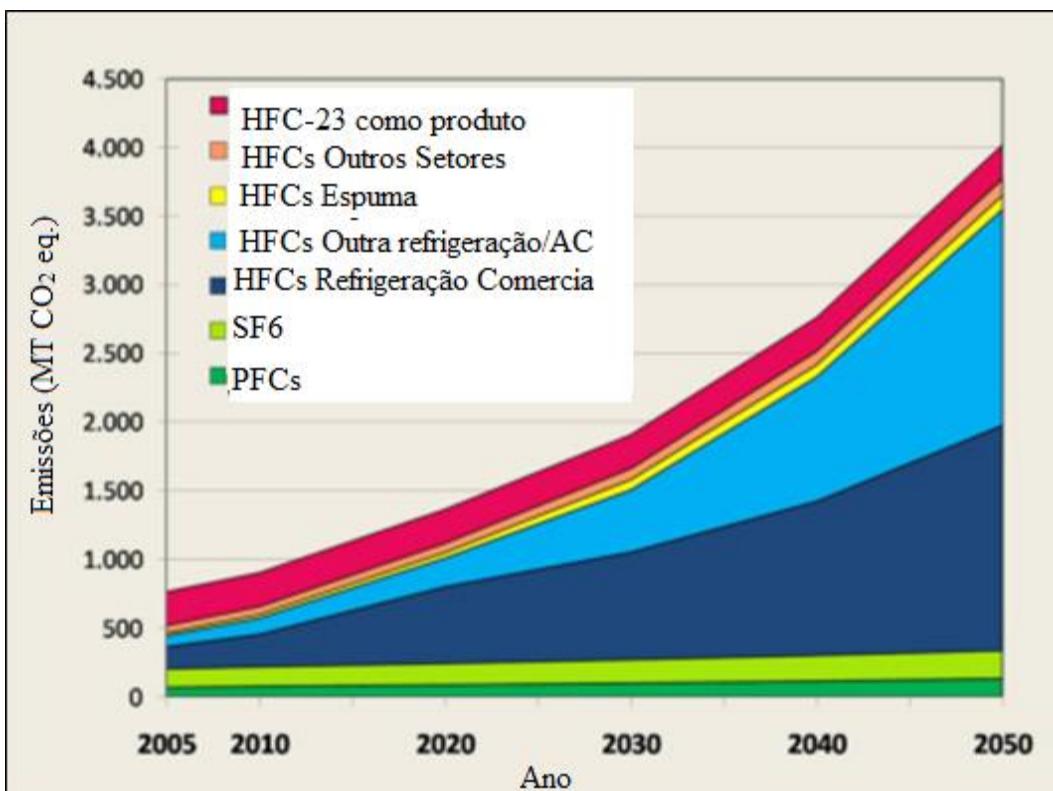


Figura 2. Emissões de gases fluorados no período 2005-2050

Fonte: GSCHREY & SCHWARZ (2009)

1.2.1 HFCs

Atualmente, as principais fontes de emissões dos gases HFCs estão relacionadas com a sua utilização como fluido refrigerante em sistemas de refrigeração e sistemas de ar condicionado, e com a sua formação como subproduto na fabricação de HCFC-22. Também há emissões de menor relevância na utilização de extintores de incêndio, na fabricação de espumas e solventes, e até mesmo em equipamentos esportivos, entre outros (USEPA 2012).

VELDERS ET AL. (2009) analisaram as projeções de emissões de um cenário de referência para os gases HFCs e constataram que a contribuição destes gases para as emissões globais no ano de 2050 pode variar de 9 a 19% em relação às emissões totais. Tal percentual pode ser ainda maior se forem implementadas medidas de controle em outros setores. No cenário elaborado pelos autores, os principais contribuintes para o crescimento das emissões dos gases HFCs são os países em desenvolvimento, como reflexo das taxas de crescimento populacional e da utilização de fluidos fluorados de

elevado GWP. A Figura 3 mostra o comportamento do consumo global de HFCs, destacando a participação dos países em desenvolvimento.

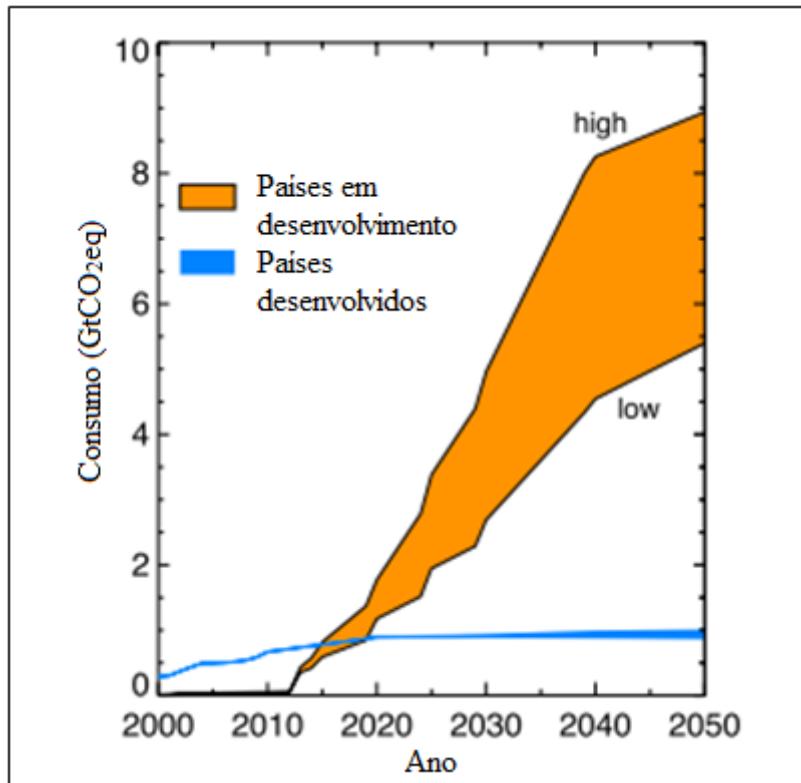


Figura 3. Consumo global de HFCs para o período de 2000-2050

Fonte: VELDERS ET AL. (2009)

Analisando as emissões dos HFCs como substitutos para as substâncias destruidoras da camada de ozônio, o setor de refrigeração e sistemas de ar condicionado deverão ser os que mais contribuirão para as emissões destes gases nos próximos anos (USEPA 2012). No relatório publicado em 2012 pela Agência Americana de Proteção Ambiental (*United States Environmental Protection Agency – USEPA*) intitulado *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990 - 2030*, estima-se que as emissões deste grupo de gases fluorados cresçam de 443 MtCO₂eq em 2010 para 1.903 MtCO₂eq em 2030 (USEPA 2012). Os países da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e as nações asiáticas não-OCDE figurariam como principais responsáveis por tais emissões.

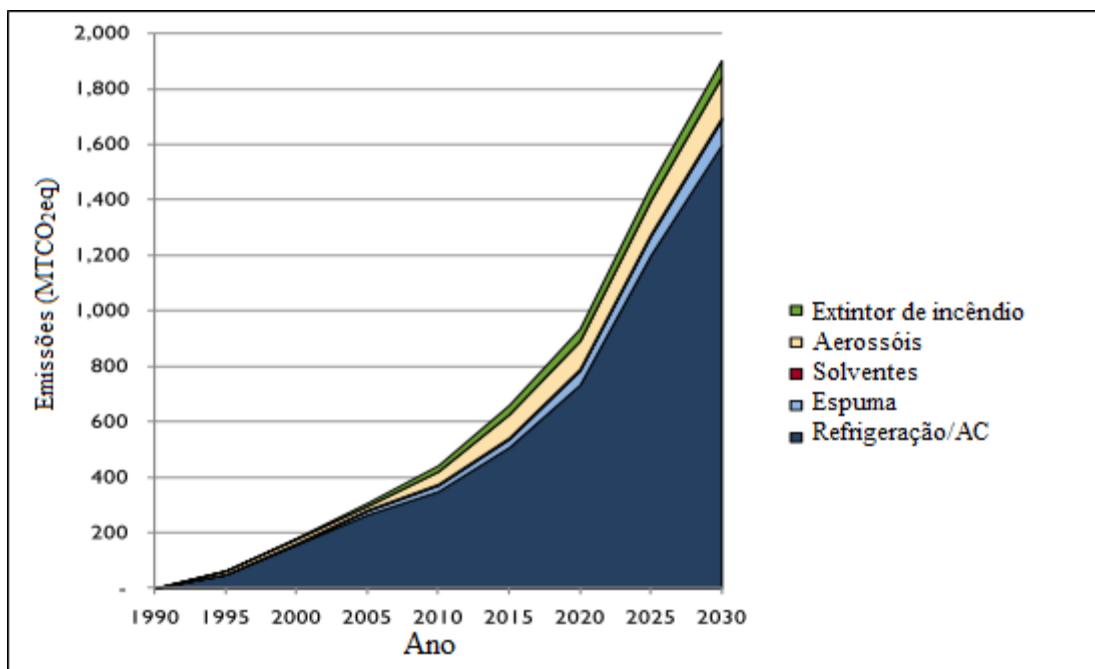


Figura 4. Projeções das emissões de HFCs por fonte

Fonte: USEPA (2012)

Estima-se que os países do continente asiático apresentem o maior crescimento proporcional para o período de 2005 a 2030, saltando de 34 MtCO₂eq para 756 MtCO₂e, (crescimento de 2.223%). Esse aumento é atribuído principalmente à China e à Índia, que possuem crescimento populacional e econômico elevado (USEPA 2012).

1.2.2 SF₆ e PFCs

O hexafluoreto de enxofre (SF₆) possui emissões relacionadas a sua utilização como arco elétrico e meio isolante em equipamentos de distribuição e transmissão, bem como na produção de alumínio, monitores planos e semicondutores. Já as emissões de PFCs podem ocorrer a partir da produção de alumínio, semicondutores, monitores de tela plana, células fotovoltaicas, entre outros (USEPA 2012).

Em relação aos equipamentos de distribuição e transmissão, durante a década de 90, as emissões de SF₆ apresentaram declínio de 49 a 41 MtCO₂e, devido ao aumento do custo desse gás, o que levou as empresas a reduzir sua utilização. As projeções feitas no relatório da USEPA (2012) apresentam um crescimento das emissões deste gás em 55% de 2005 até 2030 (Figura 5), movidas pela necessidade do aumento de uso da energia elétrica nos países não pertencentes na OCDE (USEPA 2012).

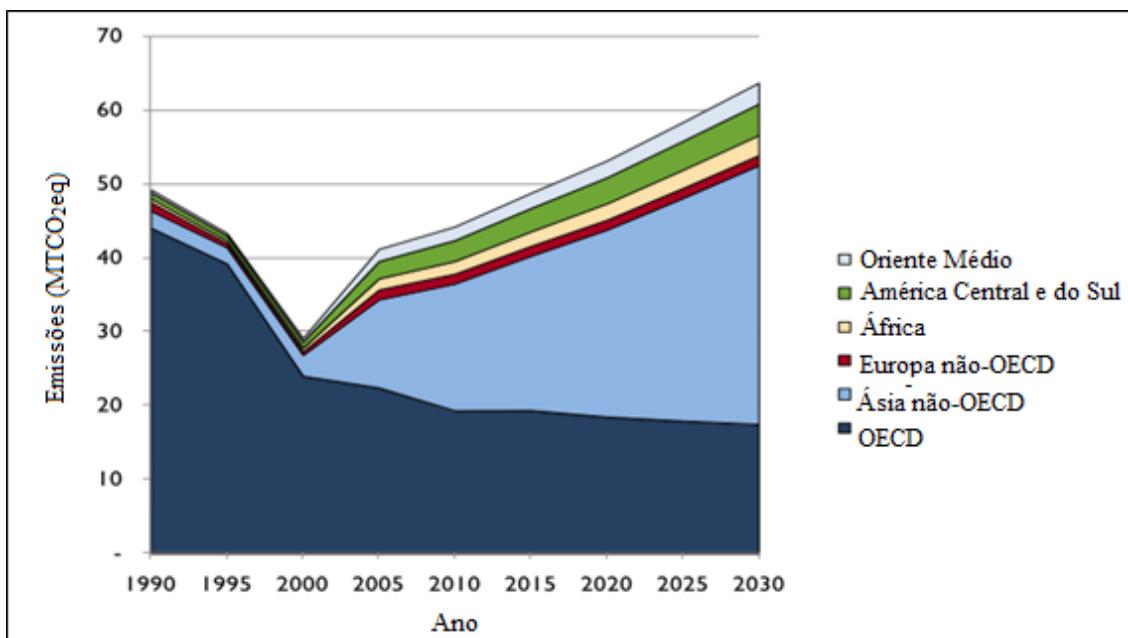


Figura 5. Emissões de SF6 em equipamentos elétricos 1990-2030

Fonte: USEPA (2012)

Na produção de magnésio, a utilização de SF₆ foi drasticamente reduzida ao longo dos últimos 25 anos, graças a iniciativas para a substituição deste gás em diversos países (USEPA 2012). Para o caso brasileiro, o uso do gás SF₆ foi substituído por dióxido de enxofre (SO₂) (MCTI 2015a). A Figura 6 a seguir mostra as projeções para o SF₆ até o ano de 2030.

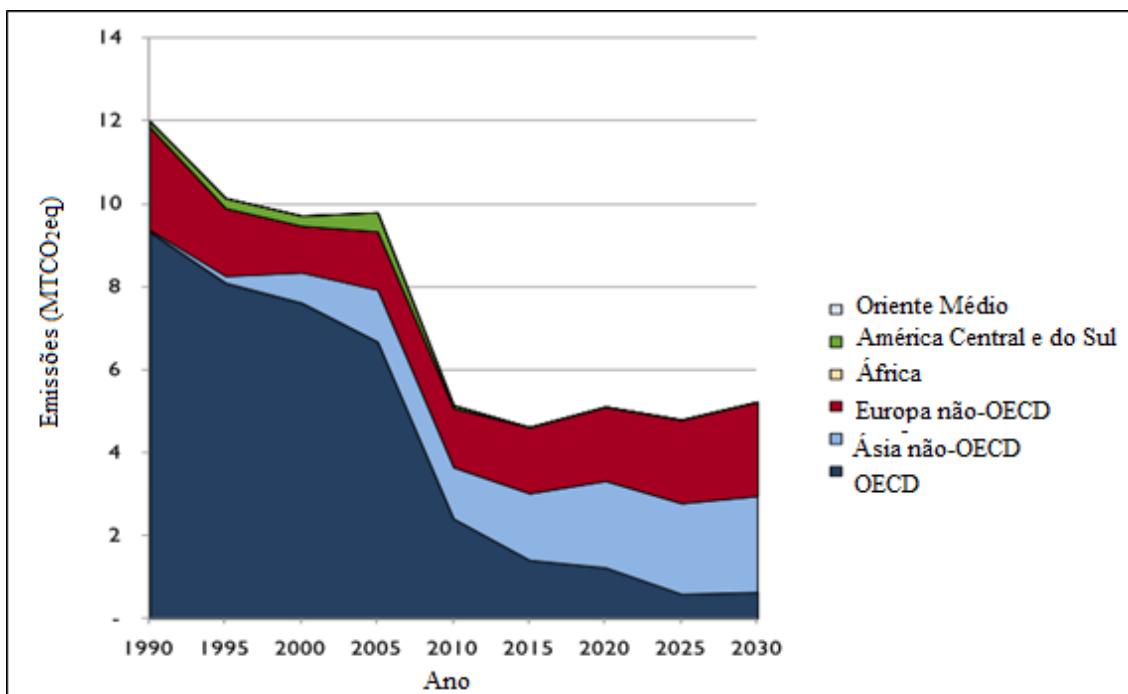


Figura 6. Emissões de SF₆ na produção de magnésio no período de 1990-2030

Fonte: USEPA (2012)

Em relação às emissões na produção de alumínio, desde 1990 estas vêm diminuindo, saindo de 84 para 31MtCO₂eq em 2030, em função de medidas voluntárias tomadas pelos produtores de alumínio primário (USEPA 2012). Entretanto, a partir de 2010, é estimado que as emissões de gases fluorados deste setor passem a crescer devido ao aumento da produção deste metal movida pelos países não pertencentes à OCDE (USEPA 2012). A Figura 7 mostra o comportamento das emissões dos gases PFCs na indústria de alumínio de 1990 até 2030.

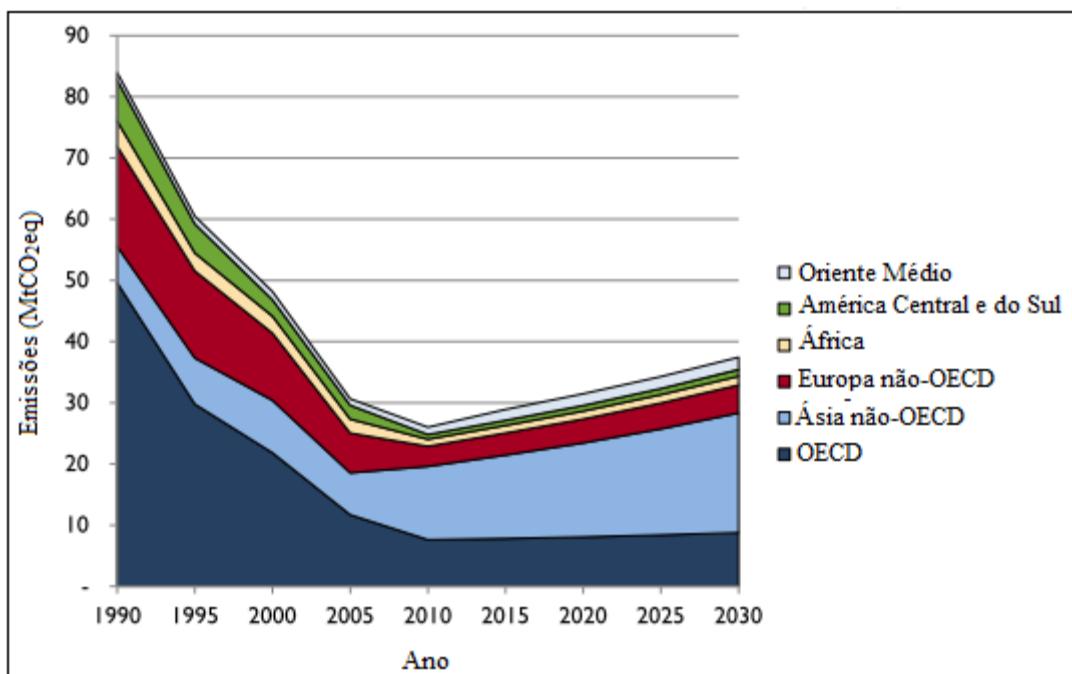


Figura 7. Projeção das emissões dos gases PFCs provenientes da produção de alumínio até 2030

Fonte: USEPA (2012)

Na produção de equipamentos semicondutores são emitidos diversos gases fluorados, como CF_4 , C_2F_6 , SF_6 , entre outros. As emissões globais destes gases em 1990 era de 12,7 MtCO₂eq. No entanto, em 1999, os fabricantes de semicondutores adotaram medidas voluntárias na redução das emissões dos gases PFCs. Tal iniciativa fez com que houvesse uma redução de 25% (de 14 a 10,5 MtCO₂eq) dos compostos perfluorados em 2010. Para os anos seguintes, estima-se que haverá um aumento das emissões a uma taxa menor que 1% ao ano na indústria de semicondutores, fazendo com que as emissões em 2030 cheguem a 21,5 MtCO₂e, 18% maiores que as emissões de 2010 (18,2 MtCO₂eq), com os países asiáticos não-OCDE e a OCDE como os principais responsáveis por tais emissões (USEPA 2012). A Figura 8 a seguir mostra o comportamento das emissões globais de gases fluorados na indústria de semicondutores para o período entre 1990 e 2030.

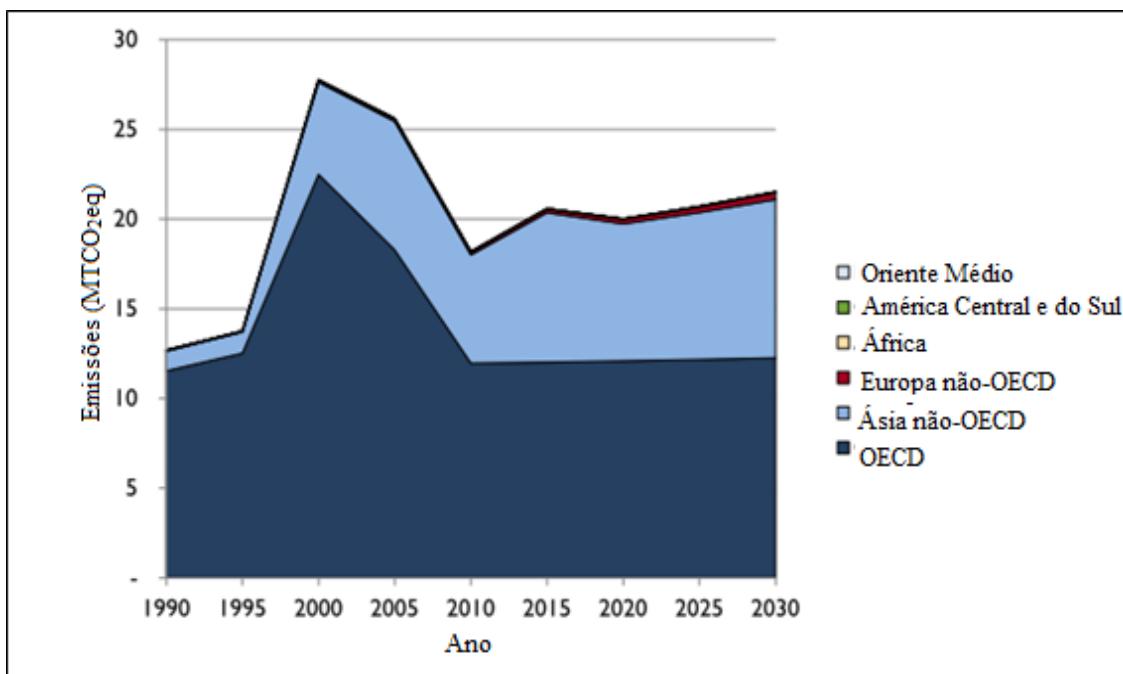


Figura 8. Emissões de gases fluorados (PFCs, SF₆ e NF₃) na indústria de semicondutores

Fonte: USEPA (2012)

Durante a produção de monitores de tela plana são emitidos PFCs, SF₆ e NF₃. Apesar de ser uma indústria nova, com emissões relevantes somente a partir de 2005 (3,9 MtCO₂eq), espera-se que as emissões globais relacionadas à fabricação destes equipamentos sofram um drástico aumento movidas pelo crescimento do setor, que possui grande demanda por equipamentos eletrônicos, tais quais televisões, monitores de computador, entre outros (USEPA 2012). A Figura 9 apresenta o desenvolvimento das emissões dos gases fluorados na indústria de monitores de tela plana entre 1990 e 2030.

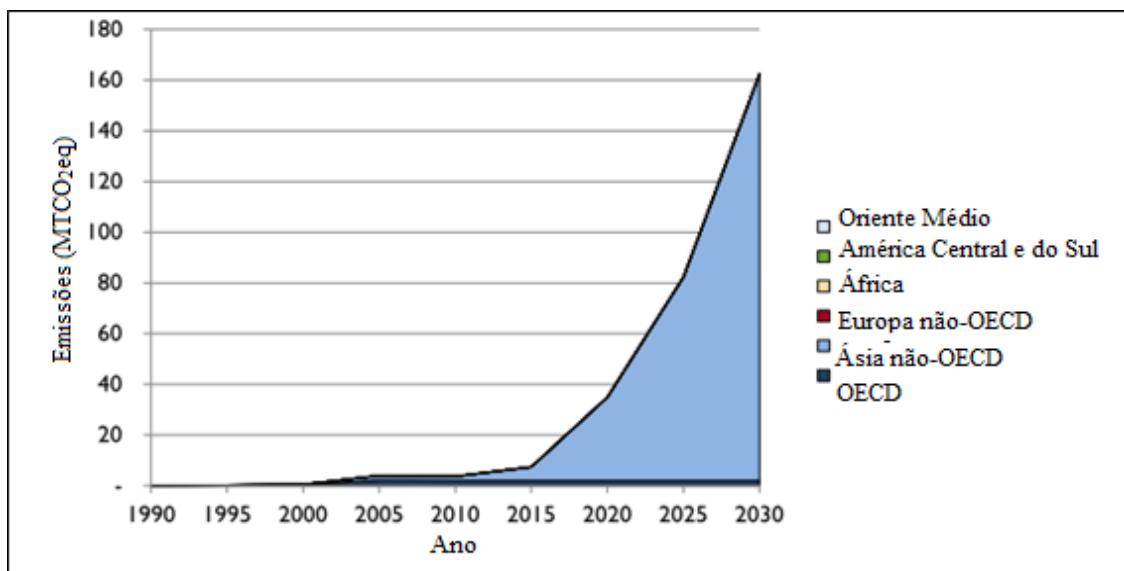


Figura 9. Emissões de gases fluorados (PFCs, SF₆ e NF₃) na indústria de monitores de tela plana

Fonte: USEPA (2012)

Comparando com os valores em 2010, as emissões em 2030 devem ser 45 vezes superiores, tendo a China como principal poluidor, responsável por 98% (USEPA 2012) das mesmas devido ao aumento da demanda por aparelhos eletrônicos (USEPA 2012) e pela diminuição das emissões pelos outros países através de metas de redução voluntárias como a estipulada pelo *World LCD Industry Cooperation Committee* (WLICC), formado por Japão, Taiwan e Coreia do Sul (WLICC 2011).

1.3 Acordos para redução de emissões de gases fluorados causadores de efeito estufa

Preocupados com o possível aumento das emissões de compostos fluorados substitutos aos destruidores da camada de ozônio, os 197 países signatários do Protocolo de Montreal se reuniram na cidade de Kigali, Ruanda, em outubro de 2016 (quase 30 anos após o acordo que visava a redução dos CFCs e HCFCs), com o objetivo de reduzir as emissões de gases HFCs (TOLLEFSON 2016).

Este encontro, denominado pelo ex-secretário de estado dos Estados Unidos, John Kerry, como “o maior passo que poderíamos ter feito neste momento para limitar o aquecimento do nosso planeta” (DAVENPORT 2016), resultou em um acordo que reduzirá gradativamente o consumo de HFCs até 2050, como mostra a Tabela 2 (OZONE SECRETARIAT 2016).

Tabela 2. Redução progressiva agendada para os HFCs em países desenvolvidos e em desenvolvimento

	Países em desenvolvimento Grupo 1 ^(A)	Países em desenvolvimento Grupo 2 ^(B)	Países desenvolvidos
Congelamento	2024	2028	-
1º passo	2029 – 10%	2032 - 10%	2019 – 10%
2º passo	2035 – 30%	2037 – 20%	2024 – 40%
3º passo	2040 – 50%	2042 – 30%	2029 – 70%
4º passo	-	-	2034 – 80%
Platô	2045 – 80%	2047 – 85%	2036 – 85%

Notas:

^(A) Grupo 1: países em desenvolvimento que não fazem parte do Grupo 2

^(B) Grupo 2: Barém, Índia, Irã, Iraque, Kuwait, Omã, Paquistão, Qatar, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos.

Fonte: UNEP (2016a)

Espera-se que este passo do Protocolo de Montreal seja capaz de prevenir 105 milhões de toneladas de CO₂ eq, que ajudará a evitar o acréscimo de 0,5 graus Celsius na temperatura global até 2100 (UNEP 2016a).

Antes do Protocolo de Quioto entrar em vigor e mesmo antes de ele ter sido assinado, alguns países já vinham apresentando regulações tanto sobre compostos fluorados substitutos aos destruidores da camada de ozônio como os PFCs e SF₆. Dentre essas iniciativas, pode-se destacar a *Significant New Alternatives Policy* (SNAP), criada pelos Estados Unidos, e considerada uma das primeiras medidas que visava reduzir as emissões de compostos fluorados (PUROHIT & HOGLUND-ISAKSSON 2016). Desenvolvida a partir da Seção 612 do *Clean Air Act* de 1990 (USEPA 2004), com o objetivo de promover a mudança de refrigerantes para compostos alternativos. Essa política apresenta uma lista dinâmica de substitutos que apresentam menores impactos à saúde e ao meio ambiente, e permite que o governo americano proíba a utilização de certos compostos fluorados (USEPA 2016b).

Já para o continente europeu, há um conjunto de regulamentações focadas nos equipamentos que emitem gases fluorados. Uma delas é a diretiva 2006/40/CE relativa às emissões provenientes de sistemas de ar condicionado instaladas em veículos a motor, também conhecida em inglês como *Mobile Air Conditioner Directive* (MAC Directive), que proíbe, a partir de 2017, a utilização de qualquer refrigerante com GWP superior a 150 em todos os veículos leves de passageiros (COMISSÃO EUROPEIA 2006a).

Ainda em 2006 foi criada a diretiva 842/2006, que buscava regulamentar o confinamento, a recuperação e a destruição relativos aos gases fluorados. Anos mais tarde, esta diretiva foi revogada pelo Regulamento Europeu 517/2014 de 16 de abril de 2014, que por sua vez apresenta, em seu Artigo 1º, os seguintes objetivos (COMISSÃO EUROPEIA 2014):

Artigo 1º:

- (i) “*Estabelece regras em matéria de confinamento, utilização, recuperação e destruição de gases fluorados com efeito de estufa e em matéria de medidas auxiliares conexas*”;
- (ii) “*Impõe condições à colocação no mercado de produtos e equipamentos específicos que contenham ou cuja funcionamento dependa de gases fluorados com efeito estufa*”;
- (iii) “*Impõe condições às utilizações específicas de gases fluorados com efeito de estufa*”; e
- (iv) “*Estabelece limites quantitativos à colocação de hidrofluorocarbonetos no mercado*”.

Em linhas gerais, este regulamento visa limitar a quantidade de gases fluorados vendidos a partir de 2015, chegando a um nível igual a 20% das vendas de 2014 no ano de 2030; banir o uso de alguns gases fluorados que apresentem substitutos menos danosos ao meio ambiente, como por exemplo, certos HFCs utilizados em refrigeração sendo substituídos por outros de menor GWP; por último, esta regulamentação busca prevenir as emissões implementando medidas de recuperação e destruição dos gases fluorados (COMISSÃO EUROPEIA 2014).

Para os países em desenvolvimento, a única medida a respeito dos compostos fluorados de efeito estufa veio com o Protocolo de Quioto, que cria o Mecanismo de

Desenvolvimento Limpo⁴ (MDL) a partir de uma proposta brasileira, visando fornecer créditos⁵ a projetos que reduzam ou evitam emissões de gases de efeito estufa em países em desenvolvimento (UNFCCC 2017). Em relação aos compostos fluorados, a partir de 2005, quando este Protocolo entrou em vigor, diversos projetos de MDL foram desenvolvidos visando a redução das emissões fugitivas na produção e consumo de halocarbonos, principalmente voltados a destruição de HFC-23 na produção de HCFC-22 e da utilização hexafluoreto de enxofre (UNFCCC 2017).

A Tabela 3 apresenta diversas medidas que visam reduzir as emissões de gases fluorados em diferentes categorias de aparelhos em diversos países e no mundo. Em relação ao Brasil, atualmente não há nenhuma política que visa controlar as emissões dos gases fluorados de efeito estufa, com exceção de um projeto de MDL que substituiu a utilização de SF₆ na produção de magnésio por dióxido de enxofre (SO₂) entre 2006 e 2011 (MCTI 2014).

⁴ O MDL faz parte do Protocolo de Quioto que visa a redução das emissões de gases de efeito estufa fornecendo créditos que podem ser comercializados entre os países (UNFCCC 2016)

⁵ Os créditos são conhecidos como Reduções Certificadas de Emissões (RCE), cada um correspondente a uma tonelada de CO₂, podendo ser trocados ou vendidos e utilizados por países para alcançar as suas reduções projetadas pelo Protocolo de Quioto (UNFCCC 2017).

Tabela 3. Regulamentações/Acordos a respeito de compostos fluorados ao redor do mundo

Região	Regulamentação/Acordo	Ano em que entra em vigor	Composto fluorado ou Fonte de emissão
União Europeia	Diretiva europeia sobre fim de vida de veículos (EC 53/2000)	2000	HFC-134a em ar condicionados veiculares sucateados
	Diretiva (EC 842/2006)	2007	HFCs em ar condicionados residenciais e comerciais, refrigeração comercial e industrial, transporte refrigerado, aerossóis, espumas, SF ₆ na produção de magnésio, janelas a prova de som, SF ₆ em outras fontes.
	<i>MAC Directive</i> (EC 40/2006)	2011	HFC-134a em ar condicionados veiculares
	<i>EU ETS Directive</i> (EC/29/2009)	2012	PFC na produção de alumínio primário
	<i>EU Effort Sharing Decision</i> (EC/406/2009)	2013	Todas as fontes de GES não cobertas pela <i>EU Emission Trading System (ETS)</i> , que inclui todas as fontes de F-gases exceto as provenientes da fabricação de alumínio primário
	Regulação 517/2014	2015	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆

Mundo	Acordo voluntário da indústria de semicondutores	2001	PFCs na produção de semicondutores
	<i>Significant New Alternatives Policy</i> (SNAP)	1990	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆
	Parceria Voluntária da Industria de Alumínio (VAIP, em inglês)	1995	PFCs na produção de alumínio primário
Estados Unidos	Créditos de melhoria em ar condicionados da USEPA	2015	HFCs em ar condicionados veiculares
	Proteção do Ozônio Estratosférico: Mudança do status de listagem de determinados substitutos sob o <i>SNAP</i>	2015	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆
Dinamarca	Regulação nacional	1992	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆
Holanda	Regulação nacional	1997	HFCs em ar condicionado e refrigeração
Países em desenvolvimento	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) sob o Protocolo de Quioto	1997	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆
Suécia	Regulação nacional	1998	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆

Austria	Regulação nacional	2002	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆
Bélgica	Regulação nacional	2005	HFCs em refrigeração comercial e industrial
Alemanha	Regulação nacional	2008	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆
Japão	Ato sobre o uso racional e manejo apropriado de fluorcarbonos (Ato 64 de 2001)	2015	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆
Suíça	Regulação Suiça sobre F-gases	2015	Todas as fontes de HFCs, PFCs e SF ₆

Fonte: Elaboração própria, baseada em PUROHIT & HOGLUND-ISAKSSON (2016)

1.4 Participação das emissões de gases fluorados em cenários de baixo carbono

Em linhas gerais, existem poucos estudos acerca deste tema (ou seja, acerca das emissões relativas aos gases fluorados causadores de efeito estufa), especialmente no que se refere a países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Assim sendo, o estudo conduzido por KITOUS & KERAMIDAS (2016), intitulado *GECO 2016 GHG and Energy Balances*, é relevante por quantificar as emissões de gases de efeito estufa, em especial os fluorados, em cenários de baixo carbono. Os autores apresentam diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa para diversos países, dentre eles o Brasil, entre 1990 e 2050.

O primeiro deles é um cenário de referência, intitulado homônimamente em inglês como *Reference Scenario*, onde as emissões de gases de efeito estufa são influenciadas pelo crescimento da renda, preço de energia e evoluções tecnológicas esperadas. Além deste, KITOUS & KERAMIDAS (2016) apresentam um cenário com base nas INDCs (*Intended Nationally Determined Contributions*), sigla que se refere às emissões de cada país quando adotados os contribuições voluntárias que os países pertencentes à UNFCCC apresentaram na Convenção do Clima da ONU, no ano de 2015, em Paris (MMA 2017; KITOUS & KERAMIDAS 2016). Por fim, os autores apresentam o cenário intitulado *2°C Scenario*, para o qual assume-se a intensificação das políticas de mitigação de gases de efeito estufa da forma que as emissões globais não ultrapassem um limite que levaria ao aumento da temperatura do planeta em 2°C em 2100, quando comparado com os níveis pré-industriais (KITOUS & KERAMIDAS 2016).

Para o caso específico do Brasil, a Tabela 4 apresenta os valores das emissões de gases de efeito estufa em 2050, discriminando as emissões de gases fluorados, nos diversos cenários descritos a cima. Destaca-se que, nos cenários de baixo carbono, as emissões destes fluidos fluorados, que são de 7 MtCO₂eq quando aplicadas as medidas da INDC, e de 6 MtCO₂eq, para o cenário 2°C.

Tabela 4. Projeção das emissões de gases de efeito estufa, fluorados inclusive em cenários de referência e baixo carbono para o Brasil em 2050

Cenário	Emissões em 2050 (Mt CO ₂ eq)
Reference scenario¹	
Total GEE	1.393
Industria e energia	776
INDCs scenario¹	
Total GEE	1.393
Industria e energia	737
Gases fluorados	7
2°C scenario¹	
Total GEE	218
Industria e energia	-15
Gases fluorados	6

Fonte: Elaboração própria com base em KITOUS & KERAMIDAS (2016)

1.5 Objetivos deste Estudo

Como apresentado nas seções anteriores, os gases fluorados apresentam um elevado potencial de aquecimento global e suas emissões têm aumentado significativamente nas últimas décadas. Em relação ao futuro, estima-se que haverá um crescimento expressivo da emissão destes gases, principalmente em economias emergentes se o Acordo de Kigali não for respeitado.

Tendo este panorama como plano de fundo, este estudo tem como objetivo elaborar cenários de projeção das emissões brasileiras de gases fluorados causadores de efeito estufa (HFCs, PFCs e SF₆) até 2050. Ademais, busca-se analisar o potencial e os custos da implementação de medidas de controle a fim de mitigar tais emissões.

1.6 Estrutura de Desenvolvimento do Estudo

Após a introdução anteriormente apresentada no Capítulo 1, no segundo capítulo são apresentadas as principais fontes globais de emissão de compostos fluorados causadores de efeito estufa, bem como uma breve explicação sobre os equipamentos que compõem cada categoria, *e.g.*, refrigeração e ar condicionado domésticos e comerciais, produção de alumínio, equipamentos de distribuição e transmissão de energia elétrica, entre outros.

Em seguida, no terceiro capítulo são destrinchadas as emissões históricas brasileiras de gases fluorados causadores de efeito estufa, detalhando-se as peculiaridades nacionais que compõe cada segmento de aparelhos emissores destes compostos.

No quarto capítulo é desenvolvida a metodologia adotada neste trabalho que permitirá a projeção dos grupos de equipamentos que contêm compostos fluorados no horizonte até 2050, bem como a projeção das emissões destes gases com ou sem medidas de controle. Também neste capítulo é abordada a metodologia utilizada a fim de calcular os custos da implementação das medidas de mitigação.

No quinto capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados das projeções das principais categorias emissoras de gases fluorados causadores de efeito estufa, a quantidade destes compostos emitidas até 2050, a quantidade mitigada através da implementação das medidas de controle propostas e os custos de abatimento quando tais medidas são introduzidas. Por fim, no sexto e último capítulo são apresentadas a conclusão do presente trabalho como também as recomendações para trabalhos futuros.

2. Gases Fluorados e Fontes de Emissão

Este capítulo irá detalhar os gases fluorados contemplados por este estudo (com base no Protocolo de Quioto), bem como os diversos setores e respectivos grupos de equipamentos que utilizam e emitem gases fluorados (HFCs, PFCs e SF₆) no mundo. Serão apresentados os equipamentos que compõem cada setor, suas nuances que influenciam nas emissões dos compostos citados, bem como medidas capazes de reduzir tais fugas. Serão abordadas as seguintes fontes: os sistemas de refrigeração e ar condicionado, os equipamentos elétricos, a produção de magnésio, a produção de HCFC-22, a produção de alumínio, a indústria de semicondutores, e outras fontes de menor importância, tais quais extintores de incêndio e a produção de espuma.

2.1 Gases Fluorados Contemplados

A Tabela 4 apresenta os gases fluorados contemplados por este estudo, selecionados com base no Protocolo de Quioto.

Tabela 5. Gases Fluorados

Gás fluorado	Nomenclatura
HFC-1234yf ^(B)	2,3,3,3-Tetrafluoropropeno
HFC-125 ^(B)	Pentafluoroetano
HFC-134a ^(B)	1,1,1,2-Tetrafluoretano
HFC-152 ^(B)	1,2-Difluoroetano
R-404a	HFC-125/143a/134a ^(A)
R-410a	HFC-32/125 ^(A)
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
CF ₄	Tetrafluorometano
C ₂ F ₆	Hexafluoroetano

Nota:

^(A) Os gases R-404a e R-410a consistem em misturas de outros gases fluorados.

Os componentes são apresentados na tabela.

^(B) Fluidos refrigerantes podem ser denominados com a letra 'R' ao invés de 'HFC' no início de sua nomeclatura (MCTI 2015c).

Fonte: Elaboração própria com base em MYHRE ET AL. (2013)

2.2 Fontes de Emissão de Gases Fluorados

2.2.1 Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado

Refrigeração, em uma definição estrita, significa manter a temperatura de um determinado meio inferior a temperatura de sua vizinhança. Em linhas gerais, no cotidiano é utilizada no sentido de manter alimentos refrigerados para que não venham a perecer, ou na conservação da temperatura para o conforto humano (DİNÇER & KANOGLU 2010).

O processo de refrigeração é feito através de um ciclo termodinâmico que absorve o calor utilizando um líquido volátil, também conhecido como fluido de trabalho ou fluido refrigerante. A maioria dos sistemas de refrigeração e ar condicionado são baseados no ciclo termodinâmico de compressão de vapor, onde o fluido refrigerante é evaporado a uma pressão constante fornecendo um meio para a absorção de calor. Em seguida este vapor é comprimido a uma pressão mais alta passando por um condensador que rejeitará o calor para o ambiente externo. Por fim, o fluido volta ao seu estado original, reduzindo a sua pressão através de um processo de expansão. Este ciclo é representado na Figura 10 (GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY 2011a).

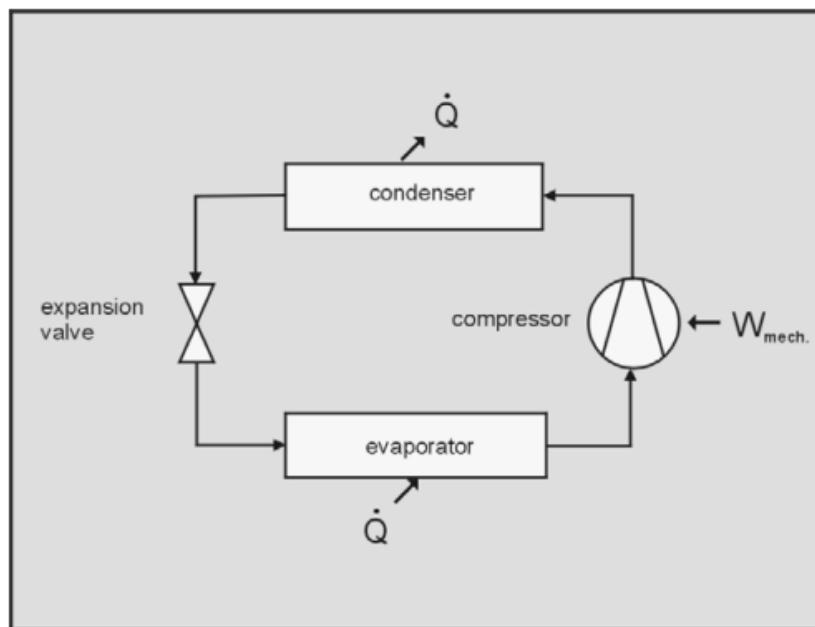


Figura 10. Diagrama de um ciclo de refrigeração de compressão a vapor

Fonte: GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY (2011), APUD GRAGE E PAREIDT (2000)

Os equipamentos que utilizam este sistema podem ser organizados nas seguintes categorias: refrigeração doméstica, refrigeração comercial, refrigeração industrial, ar condicionado estacionário, e ar condicionado veicular (MCTI 2015b).

2.2.1.1 Refrigeração doméstica

Os aparelhos de refrigeração doméstica consistem em geladeiras e freezers (verticais ou horizontais). São um dos principais equipamentos que consomem refrigerantes fluorados com cerca de 100 milhões equipamentos produzidos por ano mundialmente, sendo metade dessa produção em países em desenvolvimento (SCHWARZ ET AL. 2011).

Até o início dos anos 90, neste grupo de equipamentos, o refrigerante utilizado era o CFC-12, sendo substituído, após o Protocolo de Montreal (GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY 2011a). Como alternativa, o mercado adotou o R-134a (ou HFC-134a), sendo responsável por 63% de todo o consumo neste setor e, o R-600a (isobutano), ambos com uma carga estimada de 50g a 250g de refrigerante por aparelho (UNEP, 2009).

A principal forma de emissão de gases fluorados nestes equipamentos acontece no fim de vida, uma vez que a taxa de vazamento destes equipamentos durante o uso é baixa, cerca de 1% ao ano da carga total original (PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016). Assim, uma medida de controle que vise o recolhimento, a destruição ou reciclagem do aparelho, é a maneira mais eficiente de evitar as emissões de gases fluorados. Pode-se assumir que esta medida de controle é capaz de remover 85% das emissões deste setor (L. Höglund-Isaksson, Winiwarter, & Purohit, 2013).

Em um cenário onde o HFC-134a também seja restringido na refrigeração doméstica, uma opção seria utilizar o R-290 (propano) ou R-600 (isopropano), gases que já possuem utilização difundida no mundo, sendo no Brasil utilizados em refrigeradores domésticos desde 2004 (MCTI 2010). Estes gases apresentam como vantagem um GWP-100 baixo, inferior a 5. Em contrapartida, são gases inflamáveis, o que pode trazer riscos à sua utilização (USEPA 2013).

2.2.1.2 Refrigeração Comercial

Os equipamentos utilizados na refrigeração comercial são responsáveis por 32% do consumo mundial de HFCs e 40% do consumo de HFCs no setor de refrigeração e ar

condicionado (USEPA 2010), abrangendo todos os equipamentos de refrigeração de alimentos e bebidas utilizados em supermercados, restaurantes, lojas de conveniência, entre outros estabelecimentos comerciais (MOTA-BABILONI ET AL. 2015). Possuindo uma grande variedade de tamanhos e aplicação, podem ser segregados em três tipos: compactos, unidades condensadoras e sistemas centralizados.

Equipamentos compactos, ou *stand alone*, são aparelhos onde todos os componentes são integrados, como por exemplo expositores (*vending machines*) ou congeladores comerciais. Estes aparelhos eram fabricados utilizando CFCs, no entanto, hoje os fluidos refrigerantes mais utilizados neste setor são os HFCs (MCTI 2015a), cujas cargas podem variar entre 0,1 a 1 kg (IPCC 2005).

Unidades condensadoras são pequenos aparelhos com compressores e condensadores localizados na área externa às vendas, e evaporadores localizados na área de venda ou junto com a câmara refrigerada onde o alimento é armazenado, sendo utilizados em estabelecimentos como padarias, açouques e lojas de conveniência. No Brasil, o refrigerante usado majoritariamente é o R-22, com um pequeno uso de HFC-134a e R-404a, fluido formado pela mistura que contém os gases HFC-125, R-143a e HFC-134a (MCTI 2015a) e cujo GWP100 é igual a 3.943 (MYHRE ET AL. 2013), com uma carga variando de 1 a 5 kg (IPCC 2005).

Sistemas centralizados, normalmente utilizados em supermercados, são equipamentos cujo compressores são localizados em uma sala de máquinas. Estes aparelhos são os que apresentam maior carga dentre os todos citados na refrigeração comercial, podendo variar entre 100 kg e 2.000 kg (IPCC 2005). O fluido R-22 ainda é o refrigerante mais utilizado no Brasil, com uma pequena participação do R-404a (MCTI 2015a).

Para a mitigação das emissões destes fluidos utilizados na refrigeração comercial podem ser implementadas melhorias no controle de vazamento, uma vez estes equipamentos possuem, em média, taxas de vazamento de 15% ao ano (SCHWARTZ E HARNISCH 2003). Utilizando esta prática, o potencial de redução das emissões é de 42% (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013). O recolhimento no fim de vida é uma outra medida de mitigação que pode ser implementada, podendo reduzir em 90% as emissões do equipamento sucateado (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013). Por fim, a substituição do fluido refrigerante por outros de menor GWP também pode trazer reduções nas

emissões: algumas opções como o HFC-152 ou o CO₂ pressurizado podem ser adotadas (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013).

2.2.1.3 Ar condicionado estacionário

Esta categoria abrange os equipamentos de ar condicionados em residências e em prédios comerciais, por exemplo aparelhos de janela, *split*, *multi-split*, *chillers* (unidades resfriadoras de líquidos) entre outros (GSCHREY & SCHWARZ 2009). Os aparelhos de janela são os equipamentos de ar condicionado utilizados normalmente em residências, cujo objetivo é manter a temperatura ambiente entre 16°C e 26°C, utilizando uma média de 0,75 kg de refrigerante (SCHWARZ ET AL. 2011).

Os aparelhos *split* são tanto usados no setor residencial como no comercial, não só mantendo a temperatura do ambiente resfriada como também, em alguns aparelhos, fornecendo calor. Este equipamento possui duas partes, o evaporador, que fica localizado dentro do ambiente, e o compressor/condensador. Sua carga pode variar de 0,5 kg até 5,0 kg com uma média de 1,5 kg de fluido refrigerante (SCHWARZ ET AL. 2011).

Multi-split são equipamentos de ar condicionado que se dividem em diversas partes: um ou mais compressores/condensadores e diversas unidades localizadas no interior dos ambientes. A potência desses equipamentos pode variar de 10 a 200 kW, com uma média de 13,5 kg de refrigerante utilizado (SCHWARZ ET AL. 2011).

Os *chillers* podem ser divididos em duas categorias: pequenos, cuja potência é inferior a 350 kW e grandes, para potências maiores que este valor. Diferente dos outros equipamentos citados acima, eles são utilizados para o resfriamento tanto de ar como de líquidos no setor comercial e algumas aplicações industriais. Para os *chillers* pequenos, a quantidade de fluido refrigerante pode variar de 10 kg a 100 kg, para os grandes, de 50 kg até 1000 kg (SCHWARZ 2011).

Os fluidos refrigerantes utilizados nestes sistemas eram os CFCs até o Protocolo de Montreal, sendo então substituídos pelos HFCs (DE AGUIAR PEIXOTO ET AL. 2005). No contexto mundial, os equipamentos de ar condicionado estacionários majoritariamente ainda utilizam o R-22, seguido dos HFCs R-410a e R-407C, e alguns *chillers* utilizam o HFC-134a e o R-404a (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013). Medidas de controle possíveis para estes aparelhos são: controle de vazamento, melhoria dos componentes, substituição do fluido refrigerante e recolhimento no fim de vida.

De acordo com HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. (2013), melhorar os componentes do equipamento reduz em 30% as emissões provenientes do uso e o recolhimento no fim de vida, em até 90% dos equipamentos sucateados. Quanto à substituição dos gases fluorados por de menor GWP, estão disponíveis o refrigerante R-290 e o HFC-1234yf. Entretanto, para utilizar tais fluidos é necessário que o equipamento seja reprojeto por questões de segurança, uma vez que estes gases são inflamáveis. Alguns padrões internacionais limitam a quantidade de carga deste refrigerantes para evitar riscos na utilização destes aparelhos (SCHWARZ ET AL. 2011).

Por fim, pode-se utilizar dióxido de carbono nos sistemas de ar condicionado estacionário. Contudo, tal medida apresenta um elevado custo de investimento devido as melhorias que os equipamentos devem possuir por causa da sua baixa performance, sendo cerca de 20-25% maior do que os atuais sistemas (SCHWARZ ET AL. 2011).

2.2.1.4 Ar condicionado veicular

As emissões de equipamentos veiculares são provenientes dos sistemas de ar condicionado de carros (maior parcela das emissões), caminhões, ônibus, entre outros veículos (SCHWARZ 2010). Neste aparelhos, o fluido refrigerante mais utilizado é o HFC-134a (que substituiu o composto clorofluorado CFC-12, após o Protocolo de Montreal) (GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY 2011a), cujas cargas podem variar de 0,60 kg para os carros até 12 kg em ônibus (SCHWARZ ET AL. 2011). Sua emissão pode ocorrer durante a carga do sistema de ar condicionado, durante a operação, através de vazamentos causados por acidentes, e também pelo despejo final do equipamento (SCHWARZ ET AL. 2011). Estima-se que cerca de 2% das emissões sejam derivadas da carga dos aparelhos, 10% através do uso do ar condicionado e 30% pelo despejo (SCHWARZ ET AL. 2011).

Novamente, as medidas de melhoria de controle de vazamento, substituição por um gás de menor GWP e recolhimento no fim de vida são maneiras para diminuir as emissões de gases fluorados neste subsetor. Outras opções de substituição como a utilização de HFC-1234yf, HFC-152 e CO₂ também são opções para mitigação por possuírem baixo GWP (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013). Este primeiro refrigerante, o HFC-1234yf, possui GWP-100 igual a 4 e tempo de vida na atmosfera de 11 dias (NIELSEN ET AL. 2007). Já o fluido HFC-152 possui propriedades termodinâmicas muito próximas a do HFC-134a, sendo possível que ele seja utilizado com a tecnologia atual

sem modificações (GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY 2011a). Em 2008 a USEPA aprovou a utilização do HFC-152 como um refrigerante alternativo nos sistemas de ar condicionados veiculares (USEPA 2008). Por fim, dentre as opções de substituição, o CO₂ é o que apresenta menor GWP, além de ser não tóxico e não inflamável (GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY 2011a). Entretanto, como referido anteriormente, possui baixas performances em temperaturas elevadas e há a necessidade de reprojetar o sistema de ar condicionado, o que aumenta o custo da utilização deste fluido (SCHWARZ ET AL. 2011).

2.2.2 Equipamentos Elétricos (Emissões de SF₆)

Equipamentos elétricos são aqueles utilizados na distribuição e transmissão de energia elétrica. O hexafluoreto de enxofre (SF₆) é utilizado em equipamentos de média (1kV – 52kV) e alta (52kV – 380kV) voltagem (GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY 2011a) como transmissores, disjuntores, *gas insulated switchgears – GIS*, linhas de transmissão como isolante elétrico e para interrupção de corrente (MCTI 2015a). A quantidade de gás fluorado emitido em cada equipamento pode variar de acordo com a sua idade (equipamentos mais antigos possuem maior emissão que os novos) e a sua voltagem (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013).

Como não há opção para substituir o SF₆, uma alternativa de mitigação das emissões seria o controle de vazamento e a reciclagem ou despejo apropriado no fim de vida do equipamento (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013).

2.2.3 Produção de Magnésio (Emissão de SF₆)

Desde 1970, o hexafluoreto de enxofre (SF₆) é utilizado na produção de magnésio como gás de proteção durante a fusão e a fundição de magnésio ou ligas de magnésio. A função do SF₆ neste processo é criar uma camada que protege a superfície do metal fundido de oxidar e inflamar (HARNISCH & SCHWARZ 2003).

Como mitigação, outros gases podem substituir o SF₆ na produção de magnésio, como por exemplo o dióxido de enxofre (SO₂). Este gás era utilizado antes do composto fluorado, mas foi abandonado devido à sua toxicidade (RICKETTS ET AL 2003). Alguns países já substituíram o SF₆ pelo SO₂, devido a proibições, como a regulação europeia para gases fluorados, que restringiu a utilização de SF₆ no setor (COMISSÃO EUROPEIA

2014). No Brasil, um projeto de MDL, fez com que a indústria de magnésio passasse a utilizar somente o dióxido de enxofre (SO₂), em detrimento do SF₆ (MCTI 2016).

2.2.4 Produção de HCFC-22 (ou R-22) (Emissão de R-23)

HCFC-22 ou R-22 é um composto fluorado utilizado em sistemas de ar condicionado e refrigeração, na produção de espuma e de polímeros (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013). Durante a produção desse fluido ocorre a formação do subproduto HFC-23 ou R-23, cujo GWP-100 chega ser mais de 10.000 vezes maior ao do dióxido de carbono. Com tempo de vida na atmosfera superior a 200 anos (MYHRE ET AL. 2013), sua presença na atmosfera chega a 22 ppt, uma das maiores dentre os gases fluorados (WMO 2011).

O HCFC-22 ou R-22 é considerado substância destruidora da camada de ozônio, sendo seu uso controlado pelo Protocolo de Montreal. Ainda assim, sua produção só será completamente finalizada em 2040 (UNEP 2007). Mesmo com os países desenvolvidos reduzindo a sua produção na última década, as emissões de HFC-23 ou R-23 podem vir a dobrar no ano de 2030 em relação a 2010, impulsionada pelo aumento da produção de HCFC-22 ou R-22 nos países em desenvolvimento, em especial China, Índia e México (USEPA 2013).

Para evitar as emissões deste subproduto indesejado, todos os produtores de HCFC-22 ou R-22 nos países desenvolvidos contam com processos de otimização ou de destruição térmica do HFC-23 ou R-23, e em alguns casos até um processo de coleta deste gás para ser utilizado em sistemas de refrigeração e ar-condicionado como substituto das substâncias destruidoras da camada de ozônio (USEPA 2013). Nos países em desenvolvimento, as reduções das emissões do HFC-23 ou R-23 são motivadas por projetos de MDL, que desde 2003, fomentam estas iniciativas, com atualmente 19 projetos em vigor (UNFCCC, 2016). Como já demonstrado em diversos países (USEPA 2013), a oxidação térmica é uma boa opção para reduzir as emissões deste setor, com o potencial de reduzir em 99% as emissões de HFC-23 ou R-23 (RANDT ET AL 1999).

2.2.5 Produção de Alumínio (Emissão de PFCs)

Durante a produção de alumínio primário⁶, dois compostos perclorofluorados podem ser emitidos: o tetrafluorometano (CF_4), que possui um GWP_{100} de 6630 e tempo de vida na atmosfera de 50.000 anos, e o hexafluoroetano (C_2F_6), cujo GWP_{100} é 11.100 e o tempo de vida é de 10.000 anos (MYHRE ET AL. 2013). A emissão destes compostos ocorre durante a etapa de fundição do alumínio. Quando a alumina se encontra na cuba eletrolítica e ocorre um rápido aumento de voltagem devido a diminuição dos níveis de óxido de alumínio, o carbono do anodo reage com o flúor contido na criolita formando os gases de efeito estufa CF_4 e C_2F_6 (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2013).

Existem diferentes tipos de cubas eletrolíticas utilizadas na produção de alumínio primário: *Vertical Stud Soderberg* (VVS), *Horizontal Stud Soderberg* (HSS), *Side-Work Prebake* (SWPB), *Center-Worked Prebake* (CWPB) e *Point Feed Prebake* (PFPB), esta última considerada a tecnologia mais avançada na produção de alumínio (USEPA 2013). A mudança dos sistemas VVS, HSS, SWPB e CWPB para a cuba eletrolítica PFPB pode reduzir as emissões de gases fluorados, devido à melhora na performance durante a operação, com melhorias também na eficiência na produção e operação. Também é possível abater as emissões através da instalação ou melhoria do controle computacional do processo (USEPA 2013).

2.2.6 Indústria de semicondutores

Durante a fabricação de semicondutores⁷, diversos gases fluorados, como os PFCs, HFCs e SF_6 , são utilizados, mais especificamente durante as etapas de corrosão (*etching* em inglês) por plasma e de limpeza por deposição química a vapor (CVD em inglês) (IPCC 2006). Apesar do crescimento da indústria, no período entre 2000 e 2010, as emissões anuais dos compostos fluorados diminuíram de 28 MtCO₂eq para

⁶ Define-se como primário o alumínio que é obtido após o processamento da bauxita e da alumina (J. Cardoso *et al.*, 2010).

⁷ Utilizando uma breve definição através de sua propriedade física, semicondutores são substâncias cuja resistência está entre a de um condutor e de um isolante (MEHTA & MEHTA 2008).

18MtCO₂eq (USEPA 2012), movidas pelas ações do Conselho Mundial de Semicondutores (WSC em inglês)⁸.

Para reduzir as emissões dos gases fluorados neste setor as seguintes medidas podem ser utilizadas: abatimento térmico, abatimento catalítico, abatimento por plasma, limpeza da câmara remota com trifluoreto de nitrogênio (NF₃) e otimização do processo (USEPA 2013). O abatimento térmico destrói os gases fluorados utilizando altas temperaturas nas correntes de efluentes. Com a vantagem de não interferir no processo diretamente, essa medida é a mais utilizada no setor mundialmente. Entretanto, este processo além de emitir NO_x, requer espaço para instalação e utilização de grandes quantidades de água (USEPA 2013).

A redução através do processo de abatimento catalítico consiste na utilização de um catalizador para destruir ou remover os gases fluorados. A vantagem em relação ao processo térmico, é a menor quantidade de água requerida uma vez que esta operação ocorre em temperaturas menores. No entanto, os custos associados a reposição do catalizador são elevados, fazendo com que o abatimento catalítico seja o processo menos utilizado pela indústria de semicondutores (USEPA 2013).

O processo de abatimento por plasma consiste na utilização de uma fonte de plasma para dissociar as moléculas dos gases fluorados e estas reagirem com gases aditivos como o hidrogênio, oxigênio, água ou metano, formando compostos fluorados de baixo GWP (USEPA 2013). No processo de limpeza remota utilizando NF₃, o gás fluorado é dissociado pelo gás argônio e convertido em átomos eletricamente neutros que farão as limpezas nas câmaras, gerando como subprodutos gases que são facilmente retirados e de baixo GWP. Este processo é capaz de reduzir em até 95% as emissões de gases de efeito estufa (BEU 2005). Por fim, uma otimização do processo pode ser aplicada na limpeza de câmaras, sendo capaz de reduzir de 10 a 56% as emissões através da modificação (BEU 2005).

⁸ Em 1999, o WSC estabeleceu uma meta voluntária entre os produtores de semicondutores com o objetivo de reduzir em, no mínimo, 10% as emissões de PFCs. Ao final de 10 anos, as reduções foram superiores a 30%. Tal iniciativa foi agraciada pela Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA) (WSC 2015).

2.2.7 Outras fontes de emissão de HFCs

Outras fontes menores que emitem HFCs incluem: a produção de espumas, os aerossóis, os extintores de incêndio e os solventes, que correspondem a respectivamente 11%, 5%, 4% e 1% do consumo global de HFCs como substitutos aos compostos destruidores da camada de ozônio (UNEP 2011).

2.2.7.1 *Produção de espumas*

Pode-se definir espuma como uma massa constituída por uma matriz, que é formada por um polímero orgânico ou um material inorgânico, e uma célula de densidade inferior do que a da matriz (USEPA 2013). As espumas são segregadas em rígidas, flexíveis, moldadas e termoplásticas, com utilização em automóveis, na construção civil, isolamento térmico em refrigeradores, entre outros (MCTI 2015a).

Durante a produção de espumas orgânicas poliméricas, agentes de expansão químicos ou físicos são utilizados para formação das células. Os químicos são agentes que reagem durante a etapa de polimerização, liberando dióxido de carbono que age na expansão do material. Já os agentes físicos são compostos introduzidos na produção, agindo como agente de expansão durante a sua evaporação. Estes últimos agentes são compostos orgânicos voláteis, como CFCs, HCFCs ou HFCs (GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY 2011a).

Com a restrição as substâncias destruidoras da camada de ozônio, a indústria de espumas passou a utilizar os compostos HFCs com destaque para o HFC-134a, HFC-152, R-245fa e R-365mf (USEPA 2013). Como medida de controle para a redução das emissões neste setor, uma opção é a substituição dos compostos fluorados por hidrocarbonetos como agentes de expansão (USEPA 2013). Os hidrocarbonetos são substâncias mais baratas e com menor GWP do que os hidroclorofluorados, no entanto, apresentam a necessidade de um controle de segurança, dado que os hidrocarbonetos são compostos inflamáveis (TEAP 2012).

2.2.7.2 *Extintores de incêndio*

Os HFCs podem ser utilizados como agentes extintor em equipamentos de combate a incêndio, com emissões derivadas de vazamento, descargas acidentais e a sua utilização. Neste setor, o fluido mais utilizado é o R-227a correspondendo a 90% de todos os gases fluorados usados no combate a incêndio, sendo o restante, R-23 e HFC-

125 (USEPA 2013). Estima-se que 21 MtCO₂eq foram emitidos partir dos extintores e para 2020 está quantidade poderá dobrar (USEPA 2013).

Novamente, a substituição do composto fluorado por outro de menor GWP é a principal maneira de reduzir essas emissões. O fluido perfluoracetona, FK 5-1-12, apresenta características similares ao HFC utilizado aqui, como tempo de descarga de aproximadamente 10 segundos e pressão do sistema. Entretanto, o custo do gás e o custo de investimento do perfluoracetona é, respectivamente, 80% e 15% maior do que o do atual sistema (USEPA 2013).

2.2.7.3 *Solventes*

Na limpeza de certos equipamentos eletrônicos, por exemplo em equipamentos aeroespaciais, médicos e óticos, é necessário lavar a superfície de todo resíduo, gordura ou poeira. A limpeza de precisão é importante para que estes equipamentos, que são sensíveis, funcionem satisfatoriamente (USEPA 2013). Até o banimento dos compostos que destruíam a camada de ozônio, o principal solvente para esta limpeza era o CFC-113 devido suas qualidades: inerte em relação aos equipamentos, não-tóxico e boa capacidade de dissolver gordura (USEPA 2013). Atualmente esta tarefa é realizada pelos HFCs, com destaque para o R-43-10mee.

Mesmo o solvente fluorado sendo constantemente reciclado, cerca de 90% do HFC consumido em um ano é emitido durante a sua utilização. Estas emissões contabilizaram cerca de 5 MtCO₂eq em 2010, com o Estados Unidos, Japão e China como principais responsáveis (USEPA 2013). A substituição do HFC é tida como principal maneira de mitigar as emissões do uso como solventes (UNEP 2006). Uma opção são os hidrofluoretéres (HFEs) como o HFE-7100 e HFE-7200, que possuem propriedades compatíveis com os solventes HFCs (USEPA 2013) e apresentam um tempo de vida na atmosfera e um GWP menor que os HFCs (UNEP 2003).

2.2.8 Outras fontes de emissão de hexafluoreto de enxofre (SF₆)

Em relação às outras fontes de emissão de SF₆, este fluido pode ser utilizado em outros usos menores, como em janelas a prova de som, equipamentos esportivos, no enchimento de pneus, entre outros (HÖGLUND-ISAKSSON ET AL. 2012). Desde 2006, alguns desses aparelhos citados já tiveram o seu uso banido pela União Europeia (COMISSÃO EUROPEIA 2014).

3. Emissões Brasileiras de Compostos Fluorados

As emissões de gases fluorados no Brasil são apresentadas no Terceiro Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Esse documento faz parte do compromisso que o país possui com à UNFCCC, devendo informar à Conferência das Partes (COP), além do detalhamento das emissões, os avanços científicos e as políticas públicas a respeito da mitigação de gases de efeito estufa (MCTI 2015a).

Nos anexos desse inventário, as características dos diversos grupos de equipamentos que emitem os gases fluorados controlados pelo Protocolo de Quioto (HFCs, PFCs e SF₆) são descritas e detalhadas. Também é possível encontrar informações a respeito da metodologia de cálculo utilizada pelo MCTI para calcular a carga total destes fluidos, bem como suas emissões no Brasil entre 1990 e 2010 (MCTI 2015c; MCTI 2015a).

Nas seções seguintes serão caracterizados os setores emissores de gases fluorados no Brasil e descritas, com base nos anexos do Terceiro Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, as emissões de gases fluorados no âmbito nacional entre 1990 e 2000, compreendendo as peculiaridades de cada um dos grupos de equipamentos que contribuem para tal. Assim, busca-se fundamentar a posterior elaboração de cenários para projeções das emissões brasileiras de gases fluorados até 2050.

3.1 Produção de HCFC-22: Emissões de HFC-23

Atualmente não há produção HCFC-22 no Brasil. Houve apenas duas empresas que fabricavam o composto clorofluorado, sendo que uma encerrou sua produção em 1994 e a outra em 1999 (MCTI 2015a). Como consequência, as emissões do gás fluorado HFC-23 são nulas desde 2000 como mostra a Tabela 6.

Tabela 6. Emissões de HFC-23 para o período de 1990 e 2010

Gás	1990	1995	2000	2005	2010
Emissões de R-23 (toneladas)	120,2	153,0	-	-	-

Fonte: MCTI (2015a)

3.2 Setor de Refrigeração e Ar Condicionado

3.2.1 Caracterização do Setor de Refrigeração e Ar Condicionado

3.2.1.1 *Refrigeração doméstica*

No Brasil, segundo a Pesquisa Nacional Por Amostra de Domicílios (PNAD) realizada pelo IBGE (2012), em 2011, de um total 61.292 milhões de famílias, cerca de 96% (58.690 milhões), possuam geladeira e 10.077 milhões possuam aparelho de *freezer* em casa. Além da grande participação nas residências brasileiras, este é um setor que possui uma capacidade de produção de 8 milhões de unidades por ano (IBGE 2014).

Até 1999, o fluido refrigerante utilizado nas geladeiras e *freezers* brasileiros era exclusivamente o CFC-12. Após esta data, o HFC-134a passa a ser utilizado conforme o percentual apresentado na Tabela 7. A partir de 2004, houve o início da utilização de R-600 (isobutano)⁹ no Brasil. Entretanto, não há informações a respeito da quantidade de refrigeradores que possuem este fluido como refrigerante (MCTI 2015a).

Tabela 7. Parcela de aparelhos de refrigeração doméstica produzidos com HFC-134a entre 1997 e 2002

Ano	Uso do HFC-134a em aparelhos de refrigeração doméstica (%)
1997	30,3
1998	45,2
1999	39,5
2000	99,7
2001	100
2002	100

Fonte: MCTI (2015a)

⁹ De acordo com MCTI (2015a), a produção de geladeiras utilizando o R-600 começa em 2004 pela empresa BSH Continental e hoje diversos fabricantes utilizam este fluido na fabricação de refrigeradores residenciais, entretanto não é descrito o quanto é a participação deste gás fluorado na produção.

Devido a esta rápida substituição no final dos anos 90 e início dos anos 2000, a carga total de HFC nos equipamentos de refrigeração doméstica aumentou drasticamente, saindo de pouco mais de 200 toneladas de HFC-134a em 1997 para, aproximadamente, 1.150 toneladas em 2010, como mostra a Figura 11.

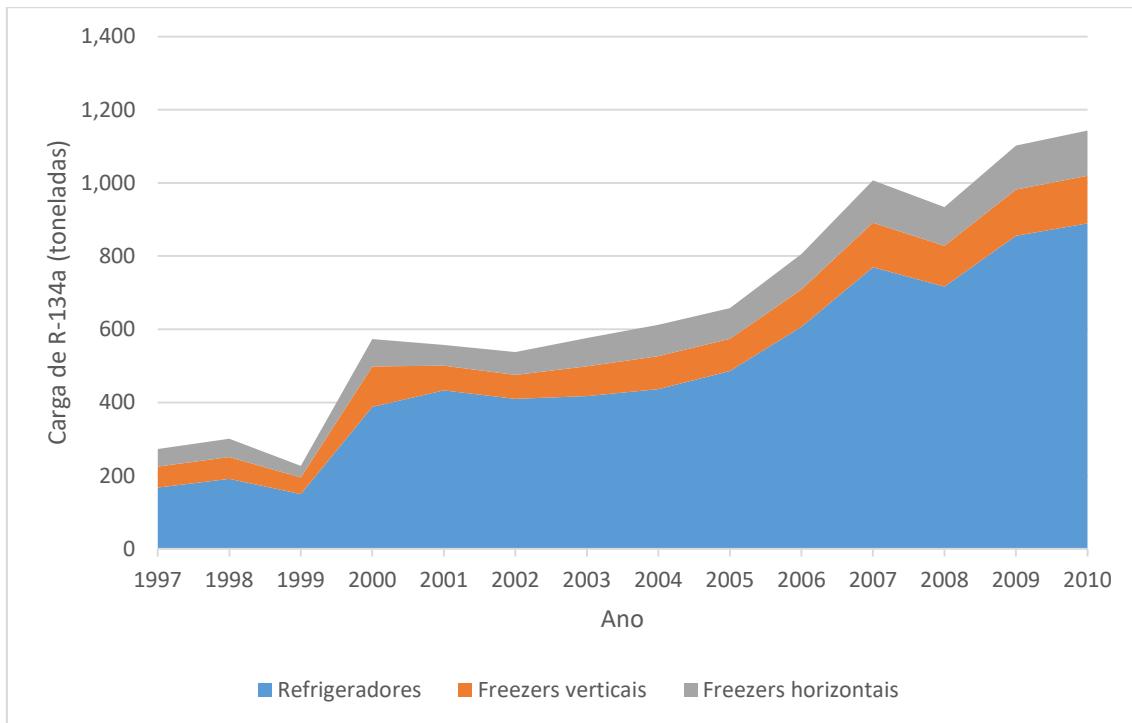


Figura 11. Evolução da carga de HFC-134a total contida em novos refrigeradores domésticos entre 1990 e 2010

Fonte: Elaboração própria, com base em MCTI (2015a)

Como o relatório do MCTI (2015a) não segregava os resultados das emissões provenientes exclusivamente do setor de refrigeração doméstica, não é possível saber quanto das emissões de HFCs corresponde a este setor. Também é importante lembrar, como fora dito anteriormente, que não foram consideradas as emissões provenientes do sucateamento, somente as emissões na montagem e na operação, que para este setor são menores que 1%.

3.2.1.2 Refrigeração Comercial

No inventário brasileiro, a refrigeração comercial se resume aos equipamentos similares aos da refrigeração doméstica, como os expositores para bebidas, freezers, entre outros, sendo considerado um parque instalado de 4,54 milhões de unidades (MCTI, 2015a). Destes equipamentos, de acordo com o MCTI (2015a), somente a partir de 1997 HFCs passaram a substituir os compostos fluorados destruidores da camada de

ozônio, sendo que 90% destes produtos de refrigeração utilizam o refrigerante HFC-134a e o restante, R-404a.

A quantidade de equipamentos de refrigeração vendidos no Brasil utilizada pelo MCTI (2015a) está apresentada na Tabela 8. A Pesquisa Industrial Anual publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2014) apresenta a quantidade vendida destes aparelhos sob o nome de “refrigeradores, vitrinas, câmaras frigoríficas e semelhantes para produção de frio para usos industrial e comercial”.

Tabela 8. Quantidade aparelhos de refrigeração comerciais vendidos no Brasil

Ano	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Venda (mil un)	704	493	358	333	252	277	211	217	461	414	566	537	251	573

Fonte: MCTI (2015a)

Com base nas vendas apresentadas acima, MCTI (2015a) estimou a evolução da carga em novos equipamentos de refrigeração comercial entre 1997 e 2010. Neste intervalo, a quantidade de refrigerante fluorado que entrou no mercado em cada ano apresentou uma pequena diminuição, saindo de 0,28 toneladas em 1997 até 0,23 em 2010. O comportamento da quantidade de refrigerante fluorado contido nesses aparelhos ao longo do período supracitado pode ser visualizada na Figura 12.

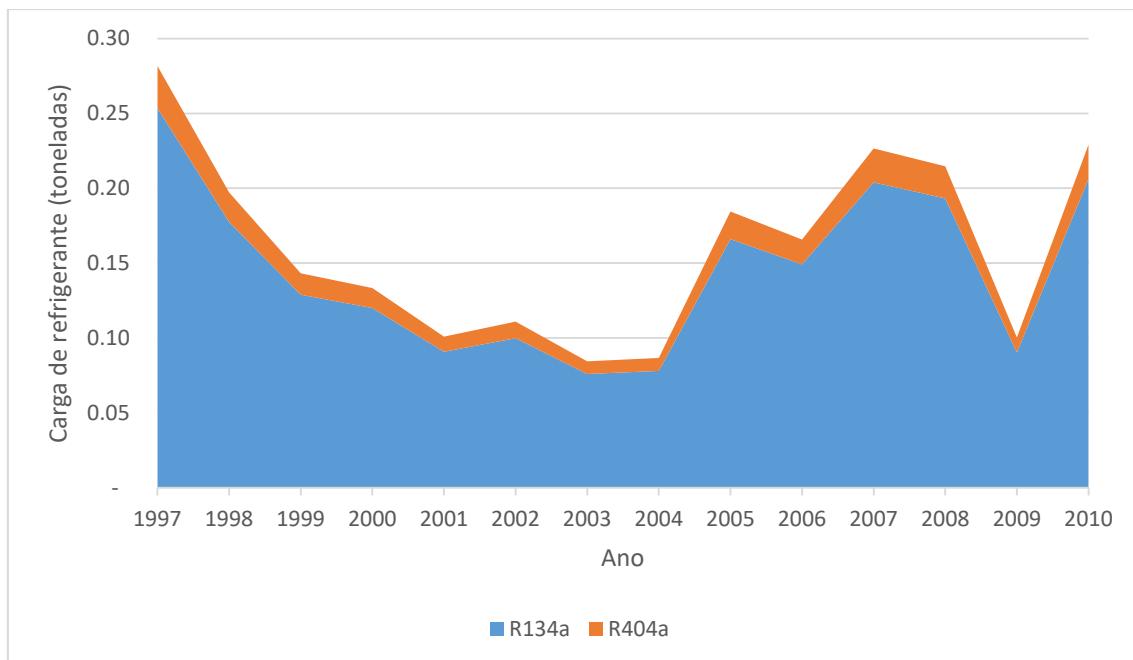


Figura 12. Carga de refrigerante fluorado nos equipamentos de refrigeração comercial (1997-2010)

Fonte: Elaboração própria baseado em MCTI (2015a)

É importante ressaltar que na Pesquisa Industrial Anual (IBGE 2014), na mesma seção em que se encontram os dados apresentados pelo MCTI para calcular a carga dos novos aparelhos de refrigeração comercial intitulada “Fabricação de máquinas e aparelhos de refrigeração e ventilação para uso industrial e comercial”, há um grupo de produtos denominado “congeladores (freezers) para usos industrial e comercial” que não foram incluídos no Relatório de Referência do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCTI 2015a). Sendo assim, é possível que as emissões de gases fluorados provenientes de equipamentos de refrigeração comercial possam ter sido subestimadas.

3.2.1.3 *Sistemas de ar condicionado em automóveis e veículos comerciais leves*

Com uma frota de automóveis e comerciais leves de aproximadamente 39 milhões de unidades em 2014, esta é uma das principais categorias de equipamentos que contribuem para as emissões de gases fluorados no Brasil (ANFAVEA 2016; MCTI 2015a). Desde 1996, todos os veículos automotivos leves produzidos no Brasil passaram a utilizar o refrigerante HFC-134a em substituição ao CFC-12 devido às restrições do Protocolo de Montreal (MCTI 2015a). A proporção da frota de automóveis e comerciais leves que possuem ar condicionado com HFC-134a é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Fração de veículos novos com ar condicionado no período entre 1990 e 2009

Ano	Fração de veículos novos com ar condicionado (%)
1990	10
1995	18
1997	27
1999	38
2001	45
2005	58
2009	65

Fonte: MCTI (2015a)

A Figura 11 mostra o crescimento da quantidade de fluido HFC-134a contida nos novos aparelhos de ar condicionado em automóveis e veículos leves ao longo do período entre 1996 e 2010. Nota-se o crescimento da utilização deste refrigerante: a quantidade deste fluido que entrou no mercado aumentou, aproximadamente, 650% entre 1996 e 2010, saindo de pouco mais de 200 toneladas no primeiro ano reportado a quase 1.400 toneladas em 2010.

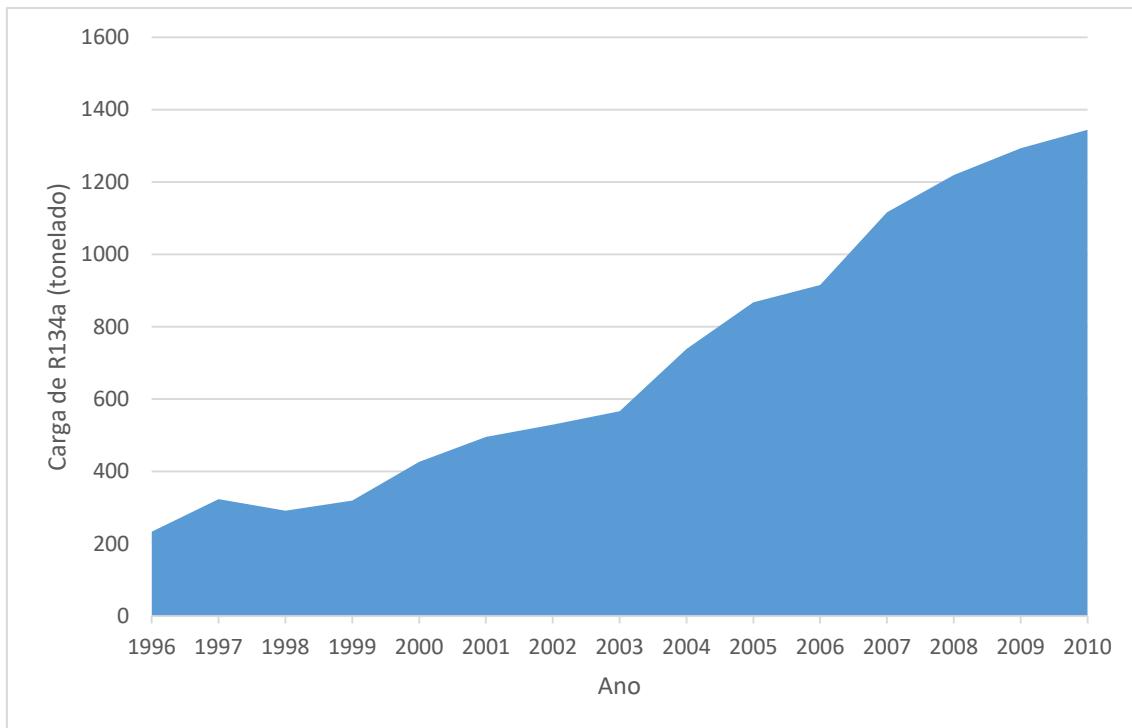


Figura 13. Carga de HFC-134a contida nos novos aparelhos de ar condicionado em automóveis e veículos leves entre 1996 e 2010

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015a)

3.2.1.4 Sistemas de ar condicionado em ônibus

O Brasil conta com uma frota de aproximadamente 640 mil ônibus urbanos e rodoviários (ANFAVEA 2016). Deste total, considera-se que 60% são ônibus urbanos e o restante rodoviários (MCTI 2015a). Em relação à utilização de sistemas de ar condicionado nestes veículos, estima-se que todos os novos ônibus rodoviários licenciados possuam tais equipamentos desde 1996. No que se refere aos ônibus urbanos, apenas 3% dos novos licenciados possuem condicionamento de ar a partir da mesma data (MCTI 2015a). A evolução da carga de HFC-134a em novos ônibus licenciados é apresentada na Figura 14. A carga de refrigerantes nestes veículos dobrou entre o período de 1996 a 2010, saindo de 30 toneladas de HFC-134a no primeiro ano para quase 60 toneladas no último ano analisado, sendo os ônibus rodoviários os maiores consumidores.

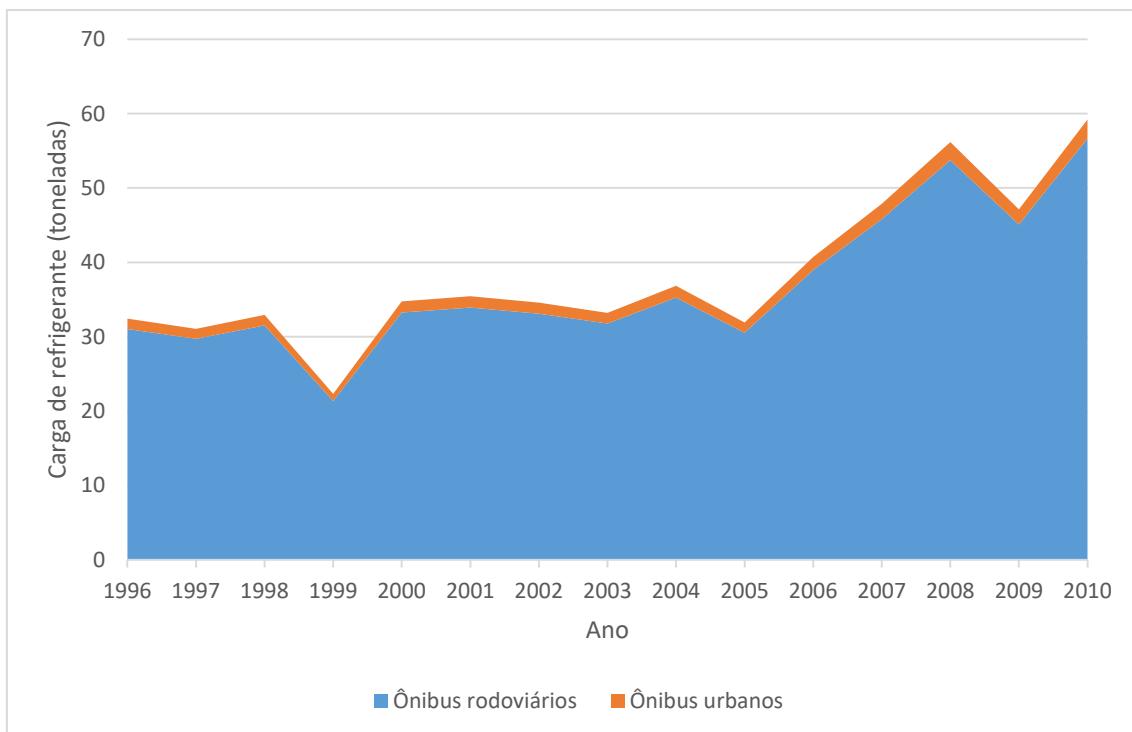


Figura 14. Carga de HFC-134a em novos ônibus licenciados por ano entre 1996 e 2010

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015a)

No entanto, para estes veículos urbanos, a parcela de ônibus que possuem ar condicionado poderá aumentar em diversos estados. Para o Rio de Janeiro em 2014, 25% da frota de ônibus (2.276 veículos) já possuía sistemas de ar condicionado (PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO 2014) e de acordo com o artigo 6º do decreto municipal 38.279/2014, todos os veículos do Serviço Público de Transporte de Passageiros por ônibus deverão possuir ar condicionado até o fim de 2016. Já em São Paulo, a Lei Municipal 16.428/2016, garante que os 80% dos ônibus possuam sistemas de ar condicionado através de uma substituição gradativa. Estes dois estados são os que mais licenciam ônibus por ano no Brasil, sendo responsáveis por aproximadamente 40% de todos os veículos que são licenciados anualmente (ANFAVEA 2016).

3.2.1.5 Sistemas de ar condicionado em caminhões frigoríficos

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a frota nacional de caminhões com câmaras ou baús frigorificados, em 2009, era de 23.715 correspondendo a 1,63% de toda frota nacional de caminhões naquele ano (MCTI 2015a).

Somente a partir de 1996 há registro da utilização de HFCs, sendo que 80% dos caminhões frigoríficos utilizam uma carga média de 4,5 kg do fluido refrigerante HFC-134a e o restante uma carga média de 6 kg de R-404a. A Figura 15 apresenta o desenvolvimento da carga destes fluidos refrigerantes em novos caminhões para o período entre 1996 e 2010 (MCTI, 2015a). No período reportado, a carga de refrigerante fluorado em caminhões frigoríficos aumentou de 1,2 toneladas, em 1996, para aproximadamente 2,1 toneladas em 2010. Este crescimento se deve, principalmente à expansão da carga do refrigerante R-404a, da forma que a carga de HFC-134a se manteve sensivelmente constante ao longo deste período.

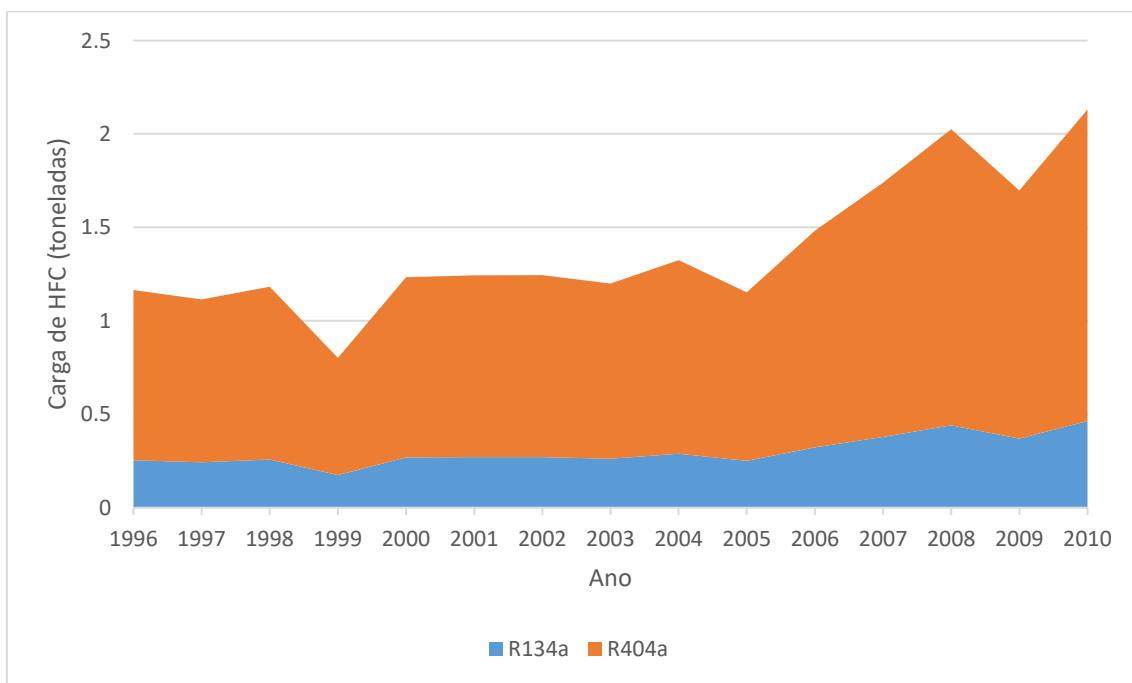


Figura 15. Evolução da carga de HFCs em novos caminhões frigoríficos licenciados no Brasil

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015a)

O Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCTI 2015a) apenas estima as cargas de compostos fluorados nos aparelhos de refrigeração em caminhões frigoríficos, não sendo estimadas as fugas provenientes dos aparelhos de ar condicionado nos caminhões, mesmo eles possuindo uma frota três vezes maior que a dos ônibus, de aproximadamente vinte e um milhões de veículos em 2014 (ANFAVEA 2016; MCTI 2015a).

3.2.1.6 Ar condicionado estacionário: unidades de resfriamento de líquidos (chillers)

As unidades de resfriamento de líquidos utilizam, majoritariamente, fluidos HCFCs como o R-123 e o R-22, sendo o primeiro apenas utilizado em chillers centrífugos de baixa pressão e o segundo em chillers centrífugos e parafuso. De acordo com o MCTI (2015a), cerca de 30% dos chillers utilizam o fluido refrigerante HFC-134a, sendo que um terço desta parcela corresponde aos equipamentos com compressor parafuso e o restante com compressor centrífugo. A carga contida em *chillers* novos no primeiro ano reportado, 1996, era de 25 toneladas, crescendo 280% até 2010, onde esta quantidade atingira mais de 70 toneladas, como pode ser visto na Figura 16.

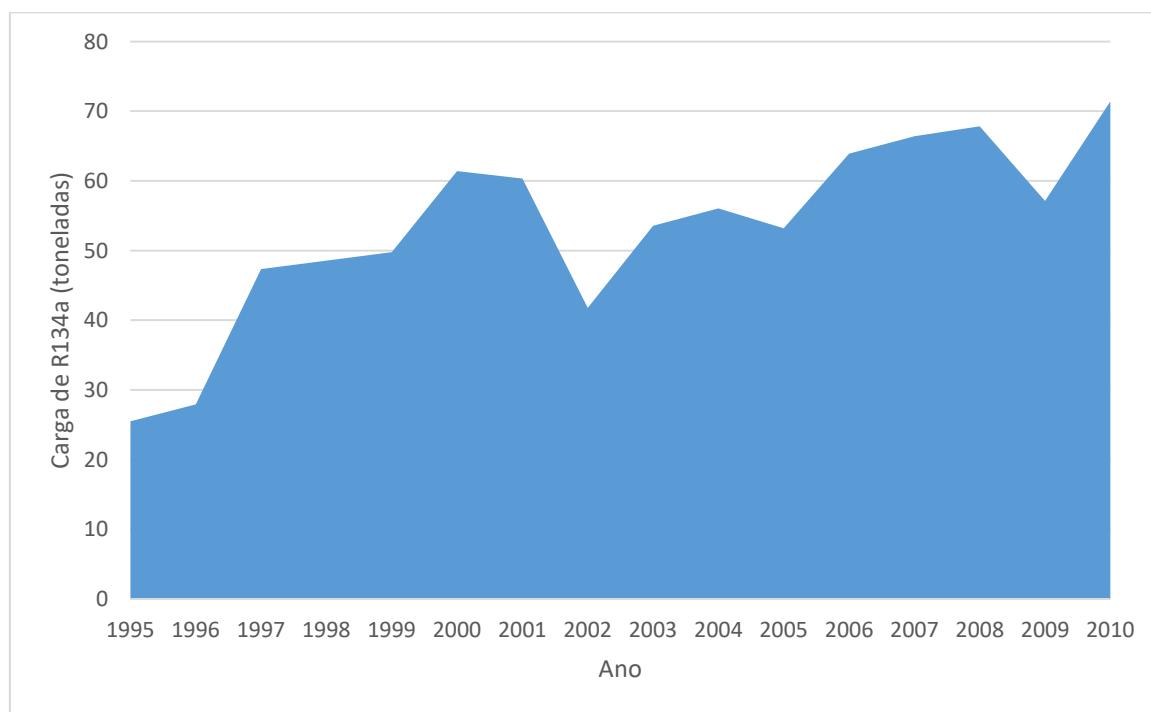


Figura 16. Evolução da carga de HFC-134a em chillers entre 1995 e 2010

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015a)

De acordo com o MCTI (2015a), até 2010, os equipamentos de ar condicionado de janela, split e multi-split só utilizavam o fluido refrigerante R-22 (G. MYHRE ET AL. 2013), tanto em equipamentos importados quanto aqueles fabricados no Brasil. Somente a partir de 2011, equipamentos que utilizam HFCs passaram a ser fabricados ou importados, no entanto como o Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa MCTI (2015a) só estima emissões até 2010, não há informações referentes à emissões deste tipo de equipamentos de ar condicionado. No entanto, há expectativas para que essas emissões aumentem dado que o Brasil conta

com cerca de 15 milhões de unidades de aparelhos de condicionamento de ar nas residências brasileiras, quase o dobro de equipamentos quando comparado com 2005 (IBGE 2005).

3.2.1.7 Bebedouros

Não há dados que descrevam, especificadamente, o mercado nacional de bebedouros¹⁰. A informação utilizada pelo MCTI (2015a) para calcular as emissões deste equipamento é proveniente da Pesquisa Industrial Anual (IBGE 2014), onde há um grupo de produtos intitulado “unidades fornecedoras de água ou sucos, inclusive bebedouros” dentro da seção “Fabricação de máquinas e aparelhos de refrigeração e ventilação para usos industrial e comercial”, e é desse tipo de equipamento cujos valores de vendas são apresentados em MCTI (2015a).

A carga anual do fluido refrigerante HFC-134a em novos bebedouros pode ser vista na Tabela 10.

¹⁰ Estima-se que em 2000 havia cerca de dois milhões de unidades de bebedouros. Não há informações mais atuais (MCTI 2015a).

Tabela 10. Carga de HFC-134a em novos bebedouros no Brasil entre 1997 e 2010

Ano	Carga de HFC-134a (tonelada)
1997	8,05
1998	9,73
1999	7,74
2000	20,20
2001	21,35
2002	17,82
2003	13,33
2004	12,35
2005	17,02
2006	19,96
2007	9,24
2008	6,81
2009	7,28
2010	19,42

Fonte: MCTI (2015a)

3.2.1.8 Outros fontes: espumas, solventes, aerossóis e extintores de incêndio

A utilização de HFCs em espumas, solventes e extintores de incêndio não foram contabilizadas pelo MCTI por serem consideradas desprezíveis face aos outros conjuntos de equipamentos que emitem gases fluorados (MCTI 2015a). Já para os aerossóis, somente a partir de 2006 há registro do uso de HFC-134a, cuja carga anual é apresentada Tabela 11.

Tabela 11. Carga de HFC-134a utilizada em aerossóis no Brasil

Ano	Carga de R-134^a (toneladas)
2006	24,53
2007	38,55
2008	25,65
2009	33,76
2010	41,02

Fonte: MCTI (2015a)

3.2.2 Emissões do Setor de Refrigeração e Ar Condicionado

As emissões de todos os equipamentos de refrigeração e ar condicionado são aglomeradas na seção de resultados no relatório do MCTI em três grupos: emissão na montagem, operação e sucateamento, sendo esta última apenas proveniente de automóveis e comerciais leves, não sendo consideradas emissões de nenhuma outra fonte (MCTI 2015a). Em relação ao outro fluido refrigerante utilizado nos equipamentos de refrigeração e ar condicionado no Brasil, o R-404a, este foi fragmentado de acordo com a sua composição que contém 44% de HFC-125, 52% de R-143a e 4% de HFC-134a. Na Tabela 12 são apresentadas as emissões brasileiras de HFC-134a nestes conjuntos de equipamentos apresentados, para o período entre 1995 e 2010 (antes de 1995 as emissões deste fluido foram praticamente nulas) (MCTI 2015a).

Tabela 12. Emissões brasileiras de HFC-134a em toneladas por ano entre 1995 e 2010

Ano	Emissões de HFC-134a (toneladas)			
	Montagem	Operação	Sucateamento	Total
1995	0,3	2,5	0	2,8
1996	1,6	45,5	0	47,1
1997	6,8	156,4	1	164,2
1998	7,1	271	2,3	280,4
1999	5,9	371,1	3,2	380,2
2000	8,9	486,2	3,7	498,8
2001	8,7	615,7	6,6	631,0
2002	8,7	750,2	10,2	769,1
2003	9,4	883,0	13,2	905,6
2004	10,8	1027,1	15,4	1053,2
2005	12,9	1197,6	17,9	1227,8
2006	13,7	1391,5	25,2	1429,9
2007	16,8	1631,6	33,7	1681,5
2008	16,6	1917,6	41,7	1975,3
2009	15,8	2228,3	49,2	2293,0
2010	18,6	2591,2	57,3	2666,9

Fonte: MCTI (2015a)

A Tabela 13 apresenta os valores das emissões de HFC-125 no setor de refrigeração e ar condicionado entre 1995 e 2010, novamente, antes do primeiro ano apresentado as emissões deste refrigerante são nulas MCTI (2015a). Verifica-se, no período entre 1996 e 2010, o crescimento acentuado das emissões de HFC-125, de 0,041 toneladas no primeiro ano para 10,831 toneladas no 2010, sendo as fugas na operação responsáveis pela maior parte das emissões.

Tabela 13. Emissões de HFC-125 no setor de refrigeração e ar condicionado brasileiro

Ano	Emissões de HFC-125 (t)		
	Montagem	Operação	Total
1995	-	-	-
1996	0,001	0,040	0,041
1997	0,217	1,317	1,535
1998	0,153	2,226	2,378
1999	0,111	2,883	2,994
2000	0,103	3,513	3,616
2001	0,078	3,999	4,078
2002	0,086	4,530	4,616
2003	0,066	4,943	5,008
2004	0,067	5,370	5,437
2005	0,143	6,221	6,363
2006	0,128	7,001	7,129
2007	0,175	8,058	8,233
2008	0,166	9,072	9,238
2009	0,078	9,572	9,650
2010	0,178	10,653	10,831

Fonte: MCTI (2015a)

Por fim, a Tabela 14 apresenta os valores para as emissões de R-143a, gás que corresponde a parcela de 52% do refrigerante R-404a, no setor de refrigeração e ar condicionado. Em 1996, as fugas de R-143a eram equivalentes a 0,0048 toneladas crescendo para 12,800 toneladas em 2010, com as fugas durante a operação responsáveis pela maior parte das emissões.

Tabela 14. Emissões de R-143a provenientes do setor de refrigeração e ar condicionado no Brasil

Ano	Emissões de HFC-143a (t)		
	Montagem	Operação	Total
1995	-	-	-
1996	0,001	0,0047	0,0048
1997	0,257	1,557	1,814
1998	0,180	2,631	2,811
1999	0,131	3,408	3,539
2000	0,122	4,151	4,273
2001	0,093	4,726	4,819
2002	0,102	5,354	5,455
2003	0,078	5,841	5,919
2004	0,080	6,346	6,426
2005	0,169	7,352	7,520
2006	0,152	8,274	8,426
2007	0,207	9,523	9,730
2008	0,197	10,721	10,918
2009	0,092	11,312	11,405
2010	0,210	12,590	12,800

Fonte: MCTI (2015a)

3.3 Equipamentos Elétricos e Produção de Magnésio

As emissões brasileiras de SF₆ resultam da utilização de equipamentos de distribuição e transmissão de energia elétrica e da produção de magnésio, cuja emissão do gás fluorado foi reduzida para metade em 2009 e zerada em 2010 devido a um MDL que substituíra o SF₆ por SO₂ (MCTI,2015a).

Quanto aos equipamentos elétricos, o MCTI (2015a) estimou as emissões do gás fluorado como sendo 2% da capacidade instalada dos equipamentos de energia elétrica. No entanto, ao contrário do que é recomendado pelo IPCC (IPCC 2000), não foi estimada a quantidade de SF₆ emitido na disposição do equipamento sucateado. A Tabela 15 mostra a quantidade de SF₆ emitido de acordo com o relatório do MCTI (2015a). Verifica-se o aumento da capacidade instalada e consequentemente as emissões por uso entre 1990 e 2010, de 208,85 toneladas e 4,2 toneladas,

respectivamente, no primeiro ano estudado para 436,32 toneladas e 8,7 toneladas em 2010.

Tabela 15. Capacidade instalada de equipamentos de energia elétrica e suas emissões de SF₆ para o período de 1990 e 2010

Ano	Capacidade instalada (t)	Emissão por uso (t)
1990	208,85	4,2
1991	199,63	4,0
1992	200,76	4,0
1993	202,42	4,0
1994	204,16	4,1
1995	205,47	4,1
1996	207,05	4,1
1997	208,84	4,2
1998	236,64	4,7
1999	243,84	4,9
2000	248,31	5,0
2001	255,93	5,1
2002	264,08	5,3
2003	281,95	5,6
2004	297,81	6,0
2005	306,32	6,1
2006	313,74	6,3
2007	320,63	6,4
2008	404,24	8,1
2009	420,28	8,4
2010	436,32	8,7

Fonte: MCTI (2015a)

3.4 Indústria de alumínio

Com uma capacidade de produção de 1,7 milhões toneladas de alumínio por ano e uma produção de 0,96 milhões toneladas em 2014, o Brasil é um dos dez maiores produtores de alumínio do mundo (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2015). Atualmente o parque instalado é constituído por sete plantas, listadas na Tabela 16.

Tabela 16. Parque industrial brasileiro e suas respectivas rotas tecnológicas

Planta industrial	Rota tecnológica utilizada
Novelis em Aratu (BA)	VSS e HSS Soderberg
Novelis em Ouro Preto (MG)	HSS Soderberg
Alcoa em Poços de Caldas (MG)	VSS Soderberg
Votorantim Metais (SP)	VSS Soderberg
Albras em Barbacena (PA)	CWPB
Consórcio Alumar em São Luiz (MA)	CWPB
Valesul em Santa Cruz (RJ)	CWPB

Fonte: MCTI 2015c

A Tabela 17 apresenta a quantidade de CF_4 e C_2F_6 emitido na produção de alumínio a partir de 1990 até 2010, segregado pelo tipo de tecnologia. Neste período as emissões destes gases, respectivamente, caíram de 302,2 e 26,3 toneladas para 76,7 e 5,9 toneladas.

Tabela 17. Quantidade de CF₄ e C₂F₆ na emitido na produção de alumínio para tecnologias Soderberg e CWPB entre os anos de 1990 e 2010

Ano	Emissões de CF ₄ (t)			Emissões de C ₂ F ₆ (t)		
	Soderberg	CWPB	Total	Soderberg	CWPB	Total
1990	140,7	161,5	302,2	9,2	17,1	26,3
1991	153,3	183,3	336,6	10,1	19,0	29,1
1992	150,6	205,9	356,5	9,8	21,3	31,1
1993	138,2	196,7	334,9	8,8	20,2	29,0
1994	131,6	191,6	323,2	8,4	19,5	27,9
1995	125,3	180,7	306,0	8,1	18,2	26,3
1996	114,3	183,3	297,6	7,5	18,6	26,1
1997	89,5	113,3	202,8	5,7	10,0	15,7
1998	93,2	134,5	227,7	5,9	11,3	17,2
1999	102,1	99,2	201,3	6,6	8,7	15,3
2000	74,3	72,2	146,5	5,1	6,6	11,7
2001	52,1	62,6	114,7	3,4	5,8	9,2
2002	52,4	82,7	135,1	3,3	8,4	11,7
2003	61,1	75,1	136,2	4,0	7,5	11,5
2004	58,3	65,8	124,1	3,9	6,1	10,0
2005	63,6	60,3	123,9	4,2	6,1	10,3
2006	61,3	60,5	121,8	4,2	6,2	10,4
2007	62,5	54,9	117,4	4,3	5,6	9,9
2008	62,7	51,8	114,5	4,3	5,3	9,6
2009	61,1	21,2	82,3	4,2	2,2	6,4
2010	59,7	17,0	76,7	4,1	1,8	5,9

Fonte: MCTI, 2015c

4. Metodologia

Esta seção detalhará a metodologia utilizada neste trabalho a fim de estimar, as emissões de gases fluorados causadores de efeito estufa, o potencial de mitigação destas fugas e os seus custos em um horizonte até 2050, como também as premissas necessárias para que se possa desenvolver estes cálculos.

Na primeira parte, será explicado como é feito o cálculo das emissões de gases de efeito estufa em função da carga contida nos equipamentos, bem como as fugas quando implementadas medidas de controle. Em seguida, é apresentada a metodologia que permitirá estimar os custos da implementação das medidas de mitigação e também os potenciais de cada uma delas. Por fim, são apresentadas as metodologias utilizadas a fim de se projeta o desenvolvimento de cada categoria de equipamento que emite compostos fluorados causadores de efeito estufa.

A Figura 17, apresenta de forma resumida a maneira como serão calculadas as emissões dos gases flurados, com exceção das categorias de produção de alumínio e equipamentos de distribuição e transmissão de energia elétrica, cujas emissões são calculadas com base no crescimento de seus próprios setores.

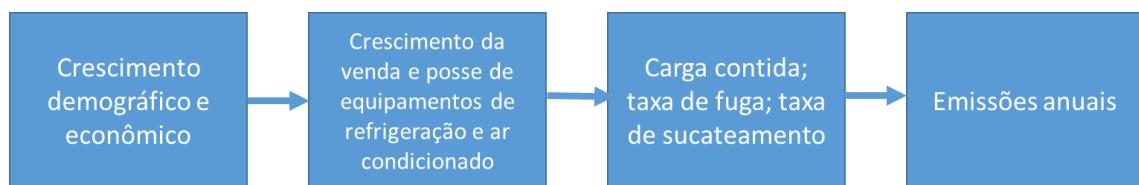


Figura 17. Fluxograma simplificado da metodologia de cálculo das emissões de gases fluorados em equipamentos de refrigeração e ar condicionado.

Fonte: elaboração própria

4.1 Cálculo de Emissões de gases fluorados

A quantidade de refrigerante fluorado emitida pelo uso de um determinado equipamento em cada ano, será calculada através do produto da carga em uso, *i.e.* a quantidade de fluido contida nos equipamentos, e o fator de emissão do aparelho, como mostra a Equação 4-1.

Equação 4-1. Emissões no uso

$$\text{Emissões no uso (kg)} = \text{carga em uso (kg)} \times \text{fator de emissão}_{uso}$$

Já as emissões por sucateamentos são definidas pelo produto da quantidade de carga sucateada de um determinado aparelho e seu fator de emissão, como mostra a Equação 4-2.

Equação 4-2. Emissões no sucateamento

$$Emissões no sucateamento (kg) = \text{carga sucateada (kg)} \times \text{fator de emissão}_{suc.}$$

A soma das emissões por uso e emissões por sucateamento em um determinado ano constitui as emissões totais anuais. As fugas provenientes da montagem não serão contabilizadas devido à ausência de informações a respeito da montagem e pela suas baixas taxas de fuga (MCTI 2015a).

Desta maneira, a quantidade emitida, em termos de CO₂eq, consiste no produto das emissões de gás fluorado pelo seu respectivo GWP₁₀₀, cujos valores são presentados na Tabela 18.

Tabela 18. Fluidos refrigerantes e seus respectivos GWP₁₀₀

Fluido refrigerante	GWP ₁₀₀
HFC-134a	1300
R-404a	3942
R-410a	1924
HFC-152	16
HFC-125	3170
HFC-1234yf	1
SF₆	23500
CF₄	6630
C₂F₆	11.100

Fonte: Elaboração própria com base em MYHRE ET AL. (2013).

Para calcular as emissões quando aplicadas medidas de controle, é introduzido um termo referente ao potencial de redução de cada medida, da forma que as emissões são descritas pelas Equação 4-3 e Equação 4-4:

Equação 4-3. Emissões no uso com medida de mitigação

$$Emissões (\text{uso com controle})(kg) = Emissões no uso(kg) \times (1 - f_{controle})$$

Equação 4-4. Emissões no descarte com medida de mitigação

$$Emissões (\text{descarte com controle})(kg) = Emissões no descarte(kg) \times (1 - f_{controle})$$

Sendo $f_{controle}$, o potencial de redução de emissões de uma determinada medida de abatimento em um determinado equipamento.

Por fim, as emissões totais, quando utilizadas medidas de controle, consiste na soma das emissões no uso e no descarte com controle em um determinado ano para cada um dos equipamentos estudado.

4.2 Cálculo do custo de mitigação

O custo de mitigação é calculado através da soma do custo de investimento relativo a medida de mitigação e os respectivos custos de operação e manutenção (O&M) que não estão relacionados com o consumo de energia¹¹. O custo unitário de uma determinada tecnologia em um determinado ano é definido pela Equação 4-5 (PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016).

Equação 4-5 Custo unitário de uma tecnologia em um determinado ano

$$C_m = I_m \left[\frac{(1+r)^T \times r}{(1+r)^T - 1} \right] + M_m$$

Onde I_m é o custo de investimento de uma tecnologia m ; $\left[\frac{(1+r)^T \times r}{(1+r)^T - 1} \right]$ é o fator que anualiza o custo de investimento com uma taxa de desconto r , cujo valor utilizado foi de 10% (PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016) e um tempo de vida da tecnologia de T anos; M_m é o custo anual de operação e manutenção de uma determinada tecnologia m .

Já o custo de mitigação pode ser definido pelo custo da tecnologia¹² dividido pela diferença entre o fator de emissão sem controle e o fator de emissão com medida de abatimento, como mostra a Equação 4-6.

¹¹ Os custos deste consumo não foram contabilizados tendo em vista que nenhuma política de mitigação estudada apresentou variações neste quesito.

¹² O custo da tecnologia (C_m) representa a diferença entre o custo da nova tecnologia e o custo da tecnologia vigente.

Equação 4-6. Custo de mitigação

$$CMg_m = \frac{C_m}{f_{sem\ controle,m} - f_{com\ controle,m}}$$

Onde CMg_m é o custo de uma determinada tecnologia m; $f_{sem\ controle,m}$ é o fator de emissão sem medida de controle de uma tecnologia m; $f_{com\ controle,m}$ é o fator de emissão com medida de controle de uma determinada tecnologia m.

Para escolher qual fluido refrigerante será o substituto em um determinado equipamento, será utilizado aquele que possuir menor custo de mitigação. Os custos de investimento, operação e manutenção, o potencial de redução e o tempo de vida das medidas de mitigação são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Medidas de controle para cada setor: seus custos, potenciais de redução e tempo de vida.

Setor	Descrição da tecnologia	Unidade da atividade	Potencial de redução de emissões (%)	Parâmetros por unidade de atividade		
				Tempo de vida (anos)	Investimento (M€/atividade)	O&M (M€/(atividade.ano))
Refrigeração doméstica	Recolhimento ao fim de vida	kt HFC	80,00	-		0,8
	Refrigerante alternativo: isobutano	kt HFC	99,79	15	92,65	-4,42
Refrigeração comercial em uso	Controle de vazamento	kt HFC	67,00			9,1
	Refrigerante alternativo: hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,92	15	913,5	-0,9
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,96	15	757,6	-0,7
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	94,43	15	136,9	-12,7
Refrigeração comercial - sucateado	Refrigerante alternativo: Hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,85	15	-	-
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	15	-	-
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	15	-	-
Ar condicionado	Recolhimento	kt HFC	80,00	-	-	9,1
	Controle de vazamento	kt HFC	30,00			3,3

residencial – em uso	Refrigerante alternativo: hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,85	10		-2,4
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10	116,8	17,9
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10	-20,6	-0,6
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10	87,6	2,3
	Recolhimento no fim de vida	kt HFC	88,00			33,3
Ar condicionado residencial - sucateado	Refrigerante alternativo: hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,85	10		
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10		
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10		33,3
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10		33,3
Ar condicionado comercial – em uso	Controle de vazamento	kt HFC	30,00			15,6
	Refrigerante alternativo: hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,85	10	34,9	-1,9
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10	124,8	-1,4
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10	138,27	-0,71
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10	169,17	2,25

	Recolhimento no fim de vida	kt HFC	88,00		33,3
Ar condicionado comercial sucateado	Refrigerante alternativo: hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,85	10	
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10	
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10	33,3
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10	33,3
Ar condicionado veicular – automóveis em uso	Controle de vazamento	kt HFC	50,00		1,9
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,93	12	170
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,72	12	48,67
Ar condicionado veicular – automóveis sucateados	Recolhimento no fim de vida	kt HFC	80,00		17,4
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10	
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10	33,3
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10	33,3
Ar condicionado veicular – comerciais leves	Controle de vazamento	kt HFC	50,00		1,9
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,93	12	170
					-0,8

em uso	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	12		
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,72	12	48,67	6,92
Ar condicionado veicular – comerciais leves sucateados	Recolhimento no fim de vida	kt HFC	80,00			17,4
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10		
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10		33,3
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10		33,3
Ar condicionado veicular – Caminhões em uso	Controle de vazamento	kt HFC	50,00			1,9
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,93	20	114,5	-1,09
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	20		
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,72	20	38,4	11
Ar condicionado veicular – Caminhões sucateados	Recolhimento no fim de vida	kt HFC	80,00			17,4
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10		
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10		33,3
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10		33,3

Transporte refrigerado	Controle de vazamento	kt HFC	20,00		16,2
	Refrigerante alternativo: hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,85	20	136,87
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	20	403,68
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	20	136,87
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,72	20	
Transporte refrigerado	Recolhimento no fim de vida	kt HFC	80,00		12,62
	Refrigerante alternativo: hidrocarboneto alternativo	kt HFC	99,85	10	
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10	
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10	33,3
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10	33,3
Ar condicionado veicular – ônibus em uso	Controle de vazamento	kt HFC	50,00		1,9
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,93	20	193,41
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	20	
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,72	20	68,63
					6,73

Ar condicionado veicular – ônibus sucateado	Recolhimento no fim de vida	kt HFC	80,00			17,4
	Refrigerante alternativo: CO ₂	kt HFC	99,95	10		
	Refrigerante alternativo: HFC-152	kt HFC	93,81	10		33,3
	Refrigerante alternativo: HFC-1234yf	kt HFC	99,80	10		33,3
Utilização de SF6 em equipamentos elétricos	Controle de vazamento e recolhimento ao fim de vida	kt SF6	84,00			86,04
Produção de alumínio - CWPB	CWPB para PFPB	Mt Al primário	85,00	20	150	-2,13
	CWPB para nova conversão	Mt Al primário	100,00	20	3045	0
	Melhoria do controle do processo	Mt Al primário	26,00	20	40	0
Produção de alumínio - PFPB	PFPB para nova conversão	Mt Al primário	100,00	20	3150	
Produção de alumínio - VSS	VSS para PFPB	Mt Al primário	92,00	20	3250	-46,15
	VSS para nova conversão	Mt Al primário	100,00	20	875	
	Melhoria do controle do processo	Mt Al primário	28,19	20	175	-7

Fonte: Elaboração própria com base em PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON (2016); PUROHIT ET AL. (2016)

4.3 Dados e premissas macroeconômicas

Nesta sessão serão apresentadas as premissas e dados macroeconômicos que conduzirão as estimativas da quantidade de fluidos fluorados contida nos principais grupos de aparelhos que emitem estes gases no Brasil.

A projeção da população brasileira por classes de idades e sexo foi obtida a partir de cenários de crescimento populacional do IBGE (2008; 2013). A quantidade de habitantes no Brasil deverá aumentar, aproximadamente, em 22 milhões, com um pico populacional, seguido de uma estabilização no crescimento a partir de 2040 como pode ser visto na Tabela 20.

Tabela 20. População total do Brasil, de 1990 a 2050

Ano	População (milhão)	Ano	População (milhão)
1990	147,59	2021	213,44
1991	149,93	2022	214,75
1992	152,23	2023	216,00
1993	154,51	2024	217,19
1994	156,78	2025	218,33
1995	159,02	2026	219,41
1996	161,25	2027	220,43
1997	163,47	2028	221,39
1998	165,69	2029	222,29
1999	167,91	2030	223,13
2000	173,45	2031	223,90
2001	175,89	2032	224,63
2002	178,28	2033	225,29
2003	180,62	2034	225,90
2004	182,91	2035	226,44
2005	185,15	2036	226,92
2006	187,34	2037	227,33
2007	189,46	2038	227,67
2008	191,53	2039	227,95
2009	193,54	2040	228,15
2010	195,50	2041	228,29
2011	197,40	2042	228,35
2012	199,24	2043	228,34
2013	201,03	2044	228,26
2014	202,77	2045	228,12
2015	204,45	2046	227,90
2016	206,08	2047	227,61
2017	207,66	2048	227,26
2018	209,19	2049	226,83
2019	210,66	2050	226,35
2020	212,08		

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2008; 2013)

Outra informação demográfica que será utilizada para estimar os estoques relacionados ao setor doméstico é a relação entre o número de residências e o número de habitantes. A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio (PNAD) forneceu a quantidade de residências para o período de 1995 até 2011 (com exceção de 2010, que para este valor foi feita uma interpolação entre os anos vizinhos) (IBGE 1995-2013). Entre o período de 17 anos citado a cima, houve um crescimento de aproximadamente

60% no número total de domicílios brasileiros, saltando de 39 milhões para 61 milhões de residenciais) como pode ser visto na Tabela 21.

Tabela 21. Número total de residências entre 1995 e 2011.

Ano	Número de residências (milhões)
1995	38,96
1996	39,74
1997	40,64
1998	41,83
1999	42,85
2000	44,67
2001	46,50
2002	47,55
2003	49,14
2004	51,75
2005	53,05
2006	54,61
2007	56,34
2008	57,65
2009	58,57
2010	59,99
2011	61,42

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (1995-2013)

Com base na quantidade de residências ao longo do período entre 1995 e 2011 e nas informações previamente apresentadas na Tabela 20 pode-se perceber que houve uma redução na razão habitantes por domicílio. Em 1995, esta porporção era de 4,1 pessoas por residência e no ano de 2011 a quantidade de habitantes em cada domicílio é de 3,21, como pode ser visto na Figura 18.

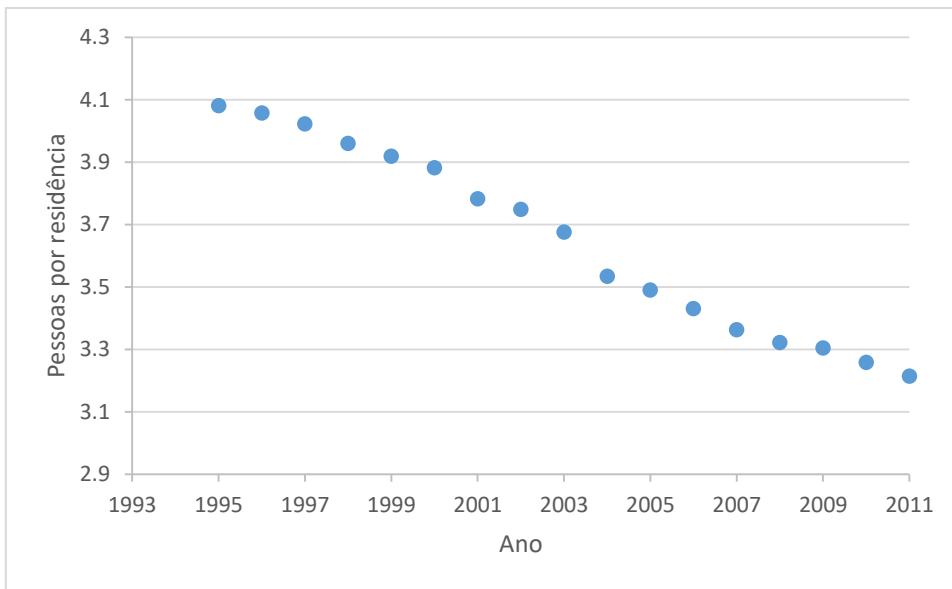


Figura 18. Pessoas por residência no Brasil entre 1994 e 2012

Fonte: elaboração própria

A projeção desta razão de habitantes por domicílio foi obtida do Cenário Econômico elaborado pela EPE (2015), onde pode-se destacar que esta razão em 2050 é de 2,30. Tal valor é justificado pelo fato do número de domicílios crescer de maneira mais acelerada que o número de habitantes devido o aumento de renda da população, permitindo que mais pessoas morem sozinhas.

Dada a razão de 3,21 pessoas por residência em 2011 e de 2,30 em 2050, foi feita uma interpolação entre os dois períodos a fim de preencher a relação de habitantes por domicílio entre o período de 2012 e 2049. A Figura 19 mostra comportamento do número total de habitantes no Brasil e a razão habitantes/domicílios para o período de 2010 e 2050.

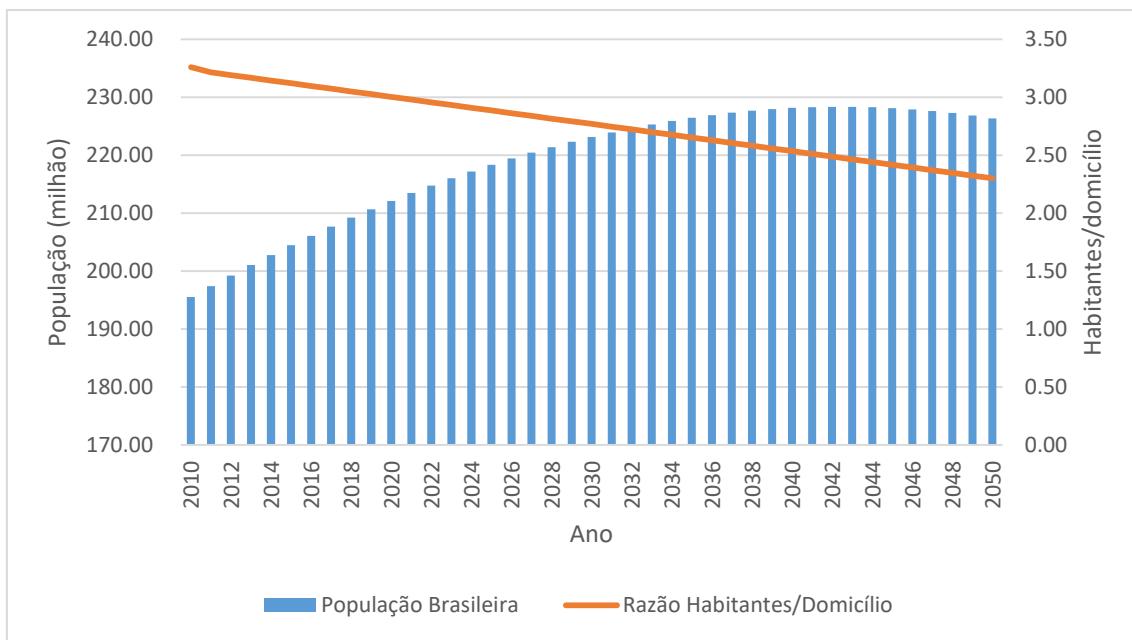


Figura 19. População e relação habitante/domicílio no Brasil para o período 2010 a 2050

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE (2008; 2013; 1995-2013) e EPE (2015b)

Utilizando a razão habitantes/domicílios entre o período de 2011 e 2050 apresentada acima, foi estimada a quantidade de residências para este período, como pode ser vista na Tabela 22. Essa relação, somada ao crescimento populacional, resulta em um acréscimo de 30 milhões de residenciais em relação ao ano de 2011, um aumento de aproximadamente 60% no total de domicílios.

Tabela 22. Quantidade de residências estimadas entre 2011 e 2050

Ano	Número de residências (milhão)	Ano	Número de residências (milhão)
2011	61,42	2031	81,56
2012	62,45	2032	82,52
2013	63,47	2033	83,49
2014	64,50	2034	84,45
2015	65,52	2035	85,40
2016	66,54	2036	86,34
2017	67,57	2037	87,27
2018	68,59	2038	88,20
2019	69,60	2039	89,12
2020	70,62	2040	90,02
2021	71,63	2041	90,91
2022	72,64	2042	91,80
2023	73,65	2043	92,67
2024	74,65	2044	93,52
2025	75,65	2045	94,37
2026	76,65	2046	95,20
2027	77,64	2047	96,02
2028	78,63	2048	96,83
2029	79,61	2049	97,62
2030	80,59	2050	98,41

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE (2008; 2013; 1995-2013) e EPE (2015b)

Outro indicador importante para as estimativas deste trabalho é a taxa de urbanização da população brasileira, apresentada na Figura 20. Entre 1940 e 2010, dados adquiridos das Séries Históricas e Estatísticas do IBGE (2016b), observa-se um crescimento da população urbana desde o primeiro ano estudado, quando a população ainda era majoritariamente rural, sendo que apenas a partir da década de 70 a maioria dos habitantes brasileiros passam a morar em zonas urbanas. Já para os últimos 25 anos, entre 1990 e 2015, o percentual de pessoas que habitam regiões urbanas subiu de 75% a 85% neste intervalo temporal citado. Como premissa para os anos seguintes até 2050, assumiu-se que a porcentagem urbana da população brasileira alcançaria os 90%, valor

apresentado no relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) chamado *World Urbanization Prospects* (ONU 2014). O desenvolvimento da taxa de urbanização brasileira entre 1940 e 2050 pode ser visualizado na Figura 20.

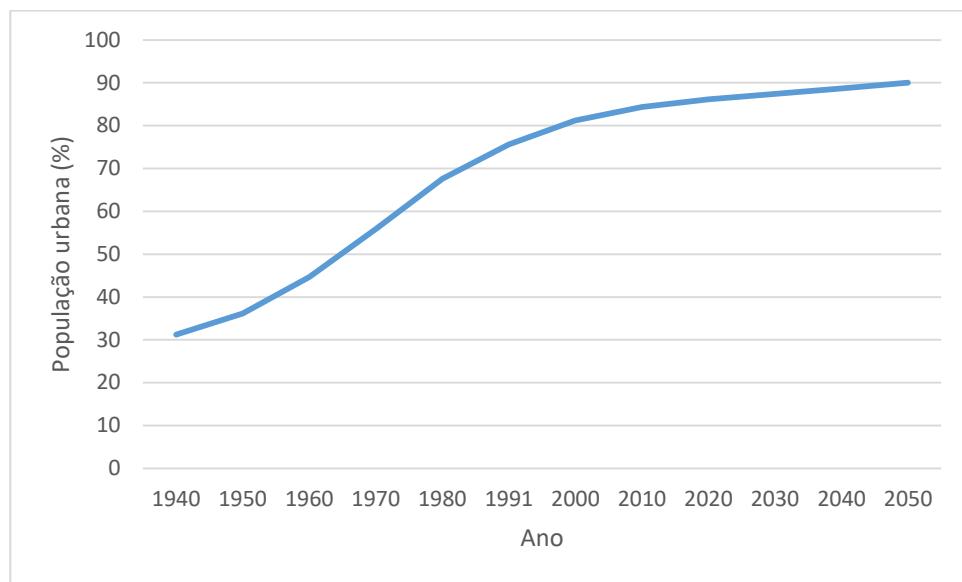


Figura 20. Taxa de urbanização brasileira para o período entre 1940 e 2050

Fonte: IBGE (2016b) e ONU (2014)

A taxa de eletrificação, apresentada na Figura 21, é uma informação que pode ajudar a compreender a quantidade de equipamentos de refrigeração e ar condicionado no setor residencial (MCNEIL, 2010). As informações foram retiradas da Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílios (PNAD) (IBGE, 1995-2013), com exceção para o período entre 1991 e 1995, cujos valores são o resultado da interpolação entre taxa de eletrificação de 1991 (IBGE 2002). Saindo de 87% em 1990, a taxa de eletrificação brasileira atingiu quase 100% das residências brasileiras em 2013. Contribuiu para o incremento desta taxa, o programa Luz Para Todos, criado em 2003, forneceu acesso a eletricidade a mais de três milhões de famílias (BEZERRA ET AL. 2017; MME 2017).

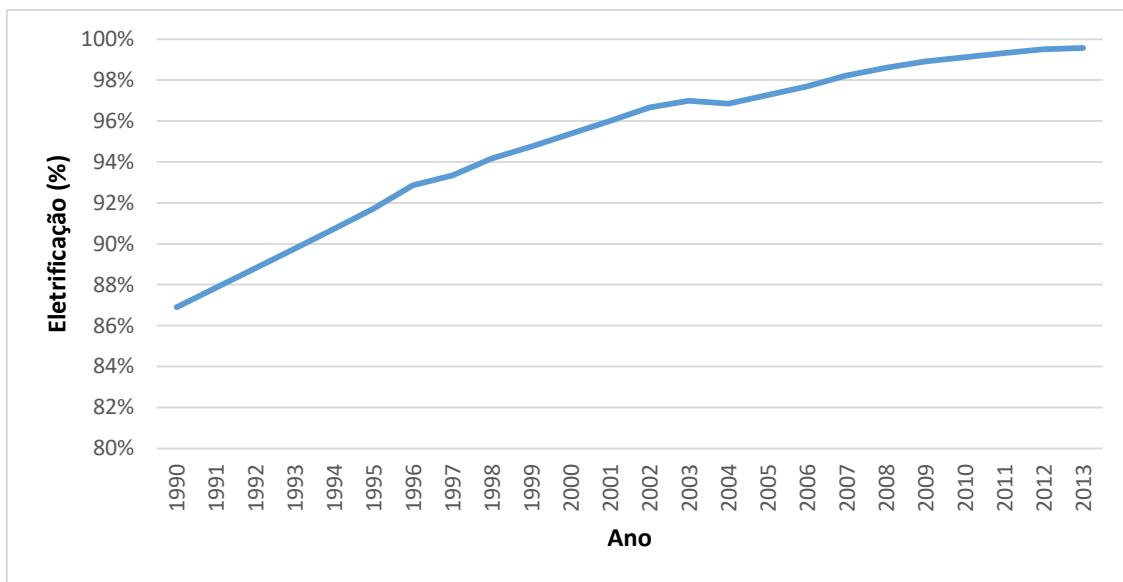


Figura 21. Acesso dos domicílios brasileiros a eletricidade entre 1990 e 2013.

Fonte: elaboração própria com base em IBGE (1995-2013; 2002)

Além destes dados demográficos, também foram utilizados indicadores econômicos para estimar o desenvolvimento das categorias de equipamentos estudados, como o Produto Interno Bruto (PIB) e o PIB *per capita*. O Sistema de Contas Nacionais Trimestrais do IBGE (2016) fornece o PIB em valores nominais para o período entre 1995 e 2015 e para os anos anteriores a esta data, os mesmos foram obtidos das Séries Históricas e Estatísticas, também do IBGE (2016b). A Figura 22, apresentada a seguir, mostra o comportamento do PIB brasileiro entre 1949 e 2015 em valores nominais.

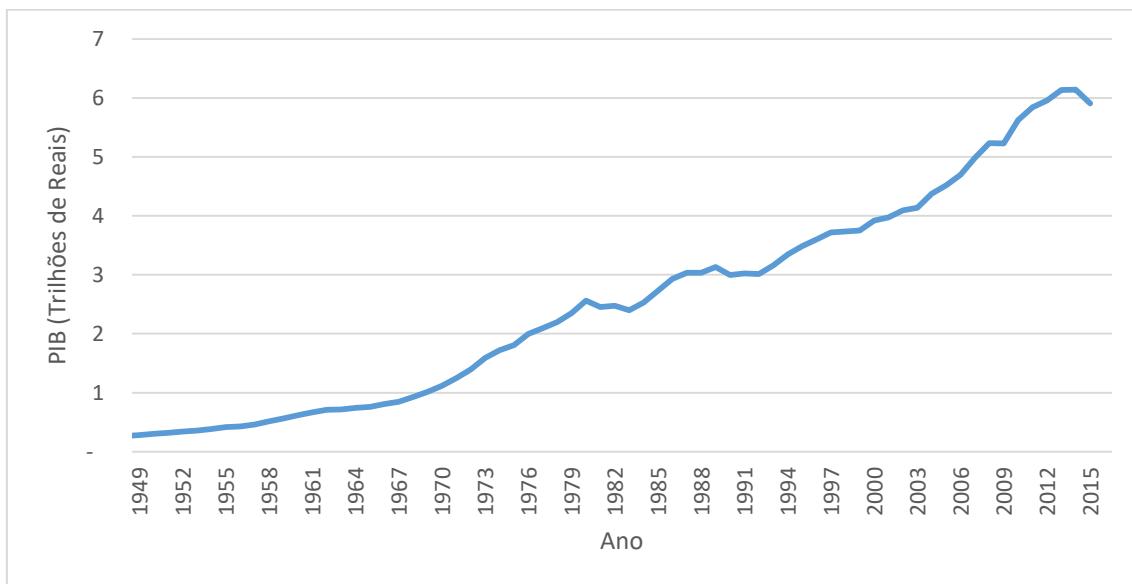


Figura 22. Valores do PIB brasileiro entre 1948 e 2015 (em reais de 2015).

Fonte: IBGE (2016a, 2016b)

Serão utilizados dois cenários com base em crescimentos possíveis do PIB brasileiro: Cenário A, mais otimista e Cenário B, mais conservador. O primeiro consiste nos valores apresentados em BRADESCO (2016), da onde foram extraídos os crescimentos entre 2016 e 2023 e para os anos seguintes assumiu-se um crescimento de 3,10% ao ano, valor compatível com o apresentado no Cenário Econômico do Plano Nacional de Energia (PNE) 2050 (EPE 2015b). No cenário mais conservador, utilizou-se dos valores apresentados em (IDDR 2015). A Tabela 23 apresenta os valores do crescimento do PIB.

Tabela 23. Crescimento do PIB para o período entre 2016 e 2050. Valores em % ao ano.

ANO	Crescimento do PIB	
	Cenário A (%)	Cenário B (%)
2016	-3,60	-3,60
2017	0,30	0,30
2018	2,50	0,29
2019	3,00	0,29
2020	3,00	0,29
2021-2025	3,00	2,83
2026-2030	3,10	2,26
2031-2035	3,10	2,11
2041-2045	3,10	1,94
2046-2050	3,10	1,76
2046-2050	3,10	1,76

Fonte: Elaboração própria com base em BRADESCO (2016); EPE (2015b); IDDR (2015)

Os valores do PIB brasileiro com base nas taxas de crescimento supracitadas para o período entre 2015 e 2050, podem ser visualizados na Figura 23. No Cenário A, de maior crescimento econômico, o PIB do Brasil em 2050 foi superior a 15 trilhões de reais, já para o segundo cenário, este valor foi de aproximadamente 11 trilhões neste último ano estudado.

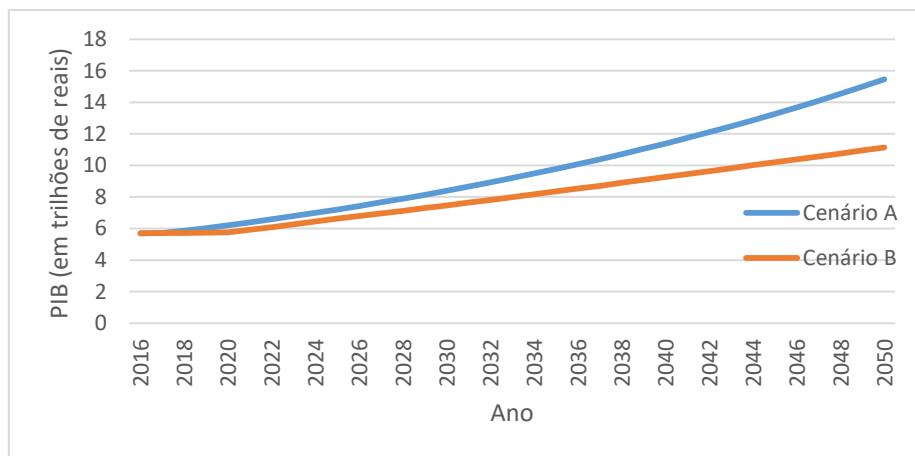


Figura 23. Desenvolvimento do PIB brasileiro entre 2015 e 2050.

Fonte: Elaboração própria com base em BRADESCO (2016); EPE (2015b); IDDRI (2015)

4.4 Refrigeração doméstica

A quantidade de equipamentos de refrigeração doméstica, geladeiras e *freezer* no Brasil foi adquirida na Pesquisa Nacional de Amostras por Domicílios entre 1995 e 2011. Estes valores, bem como a posse média destes equipamentos nas residências brasileiras, podem ser vistos na Tabela 24.

Tabela 24. A quantidade de equipamentos de refrigeração doméstica, geladeiras e freezer no Brasil

Ano	Quantidade de geladeiras (milhões)	Posse média de geladeiras	Quantidade de freezers (milhões)	Posse média de freezers
1995	29,14	75%	5,99	15%
1996	31,09	78%	7,15	18%
1997	32,52	80%	7,63	19%
1998	34,25	82%	8,22	20%
1999	35,46	83%	8,41	20%
2000	37,52	84%	8,56	19%
2001	39,58	85%	8,72	19%
2002	41,21	87%	8,78	18%
2003	42,91	87%	8,68	18%
2004	45,23	87%	8,87	17%
2005	46,66	88%	8,86	17%
2006	48,71	89%	8,98	16%
2007	51,15	91%	9,18	16%
2008	52,98	92%	9,23	16%
2009	54,71	93%	8,91	15%
2010	56,70	95%	9,49	16%
2011	58,69	96%	10,07	16%

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (1995-2013)

Com o objetivo de estimar a quantidade futura de geladeiras e *freezers* na refrigeração doméstica, foi utilizada a metodologia apresentada por MCNEIL E LETSCHERT (2010), que correlaciona a posse de eletrodomésticos com tendências macroeconômicas¹³.

De acordo com o autor citado acima, a posse média dos equipamentos em função das variáveis é uma equação em forma de ‘S’, também conhecida como função sigmoid MCNEIL E LETSCHERT (2010), apresentada na equação Equação 4-7.

Equação 4-7 Função da difusão de equipamentos de refrigeração

$$Diff = \frac{\alpha}{1 + \gamma e^{\beta_1.I + \beta_2.U + \beta_3.E}} + \varepsilon$$

Nesta equação, *Diff* é a difusão (ou posse média) de um determinado equipamento; α , o nível de saturação, ou seja, a difusão máxima, sendo utilizado o valor de 1,4 para geladeiras e 1,0 para *freezers* da mesma forma que fora utilizado em MCNEIL E LETSCHERT (2010); *I*, a renda *per capita*; *U* é a taxa de urbanização; *E*, a taxa de eletrificação; ε , o erro.

Para encontrar os coeficientes β_1 , β_2 , β_3 e γ , é preciso linearizar a função da difusão a fim de fazer uma regressão linear. Reorganizando os coeficientes, as variáveis e aplicando o logaritmo em ambos os lados da equação, ficamos com a seguinte função linearizada, apresentada na Equação 4-8.

Equação 4-8 Função linearizada da difusão de equipamentos de refrigeração

$$\ln\left(\frac{\alpha}{Diff} - 1\right) = \ln\gamma + \beta_1.I + \beta_2.U + \beta_3.E$$

Desta maneira, é possível fazer uma regressão linear múltipla entre os termos, $\ln\left(\frac{\alpha}{Diff} - 1\right)$, a renda *per capita*, taxa de urbanização e eletrificação. Com os coeficientes definidos, será estimado a posse média dos equipamentos de refrigeração doméstica até o ano de 2050.

¹³ Metodologia similar, que utiliza parâmetros macroeconômicos como taxa de eletrificação, urbanização e renda para definir a posse média de geladeiras, também pode ser visto em Cardoso & Nogueira (2007).

Dado que os equipamentos sucateados são aqueles cujo tempo de vida foi alcançado, é necessário saber a quantidade de novos equipamentos de refrigeração doméstica no território nacional. Para dados históricos, esta informação é dada pela venda dos equipamentos por ano, fornecido pela Pesquisa Industrial Anual¹⁴ (IBGE 1995-2013) e a quantidade de aparelhos importados e exportados¹⁵ (MDIC 2017), da forma que a quantidade de aparelhos novos no mercado nacional é dada pela Equação 4-9. Na Tabela 25 são apresentadas as quantidades de refrigeradores e freezers vendidos, importados, exportados e, consequentemente, aqueles novos no mercado nacional.

Equação 4-9. Quantidade de aparelhos novos no Brasil

Aparelhos novos no Brasil = vendidos + importados – exportados

¹⁴ Os valores foram retirados do equipamento cujo nome consta na Pesquisa Industrial Anual é “Refrigeradores ou congeladores (freezers), inclusive combinados, para uso doméstico” IBGE (1998-2013).

¹⁵ Os dados de importação e exportação foram retirados do portal AliceWeb utilizando o seguinte NCM: 84182100 - Refrigeradores do tipo doméstico, de compressão até 84185010 - Outros congeladores (freezers) (MDIC 2017).

Tabela 25. Quantidade de Refrigeradores e freezers que entram no mercado nacional por ano.

Ano	Refrigeradores e freezers vendidos (milhões)	Aparelhos importados (milhões)	Aparelhos exportados (milhões)	Aparelhos novos que entram no mercado (milhões)
1999	4,46	0,02	0,34	4,13
2000	3,74	0,03	0,41	3,35
2001	4,77	0,02	0,39	4,39
2002	4,15	0,01	0,35	3,80
2003	4,86	0,01	0,77	4,10
2004	5,40	0,01	0,96	4,45
2005	5,52	0,02	0,51	5,03
2006	5,82	0,04	0,50	5,36
2007	6,02	0,05	0,42	5,64
2008	6,29	0,05	0,39	5,95
2009	7,70	0,05	0,27	7,46
2010	8,12	0,08	0,27	7,94
2011	7,63	0,14	0,20	7,56
2012	8,26	0,13	0,18	8,20
2013	8,77	0,19	0,29	8,66
2014	7,70	0,06	0,39	7,36

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (1998-2013) e MDIC (2017)

Assumiu-se que a proporção de geladeiras e freezers vendidos anualmente no período entre 1999 e 2014 é a mesma que a porcentagem de cada um destes equipamentos no total de aparelhos de refrigeração doméstica em cada ano.

Para as quantidades de aparelhos novos que entram no mercado nacional a partir de 2014, esta foi definida de acordo com a Equação 4-10.

Equação 4-10 Quantidade de novos aparelhos que entram no mercado

$$N_i = Q_i - Q_{i-1} + S$$

Sendo:

N , a quantidade de novos aparelhos;

Q , a quantidade total de equipamentos;

S , a quantidade de equipamentos sucateados;

i , ano.

A fim de saber a quantidade de equipamentos sucateados anualmente, incógnita necessária para estimar as vendas anuais como também as emissões por descarte, foi utilizada uma curva de sucateamento. Com base nos valores apresentados em WELCH & ROGERS (2010), cuja curva apresenta uma média 16,6 anos para o sucateamento de geladeiras. Optou-se por reduzir em 30% o tempo de vida dos equipamentos a fim de obter resultados mais conservadores e mais harmonizados com a realidade brasileira. Desta maneira, todos os equipamentos serão sucateados ao longo de 25 anos com uma média de 10,5 anos de tempo de vida. Também assumiu-se que a mesma curva seria válida para freezers, dado que estes equipamentos apresentam vida útil média igual a de geladeiras (MCTI 2016; PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016). A Figura 24 apresenta a curva de sucateamento dos aparelhos em questão, mostrando a quantidade remanescente de equipamentos versus o ano.

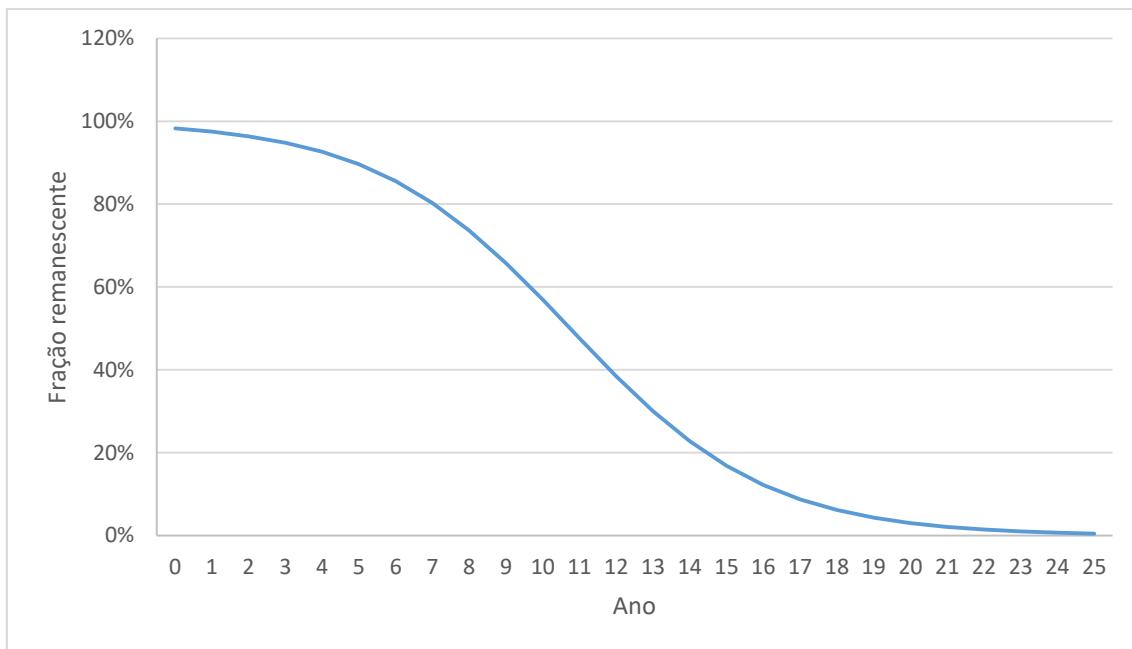


Figura 24. Curva de sucateamento de geladeiras e freezers.

Fonte: Elaboração própria com base em WELCH & ROGERS (2010)

Para finalizar as premissas a respeito do setor de refrigeração doméstica, ainda é necessário definir alguns parâmetros técnicos dos equipamentos desta seção. Foi considerado que o fluido utilizado é o HFC-134a com uma carga média de 0,150 kg para geladeiras (PUROHIT ET AL. 2016) e 0,250 kg para freezers; uma taxa de 1% de vazamento durante a sua utilização (MCTI 2016a); fuga de 85% da carga original de refrigerante quando o equipamento é sucateado (PUROHIT ET AL. 2016); e o ano de 1999

como data inicial da fabricação dos primeiros refrigeradores e congeladores com HFC-134a (PUROHIT ET AL,2016; MCTI, 2016A).

4.5 Refrigeração comercial

No setor de refrigeração comercial brasileiro há uma ausência de informações importantes, tais quais a quantidade total e a tipologia de equipamentos presentes no mercado. Estão disponíveis apenas a quantidade de aparelhos de refrigeração comercial vendidos entre 1998 e 2013, como mostra a Tabela 26. Sendo assim, é necessário fazer uma abordagem mais simplificada.

Tabela 26. Vendas de aparelhos de refrigeração comercial no Brasil entre 1998 e 2013

Ano	Aparelhos de refrigeração comercial vendidos (milhão)
1998	0,31
1999	0,39
2000	0,21
2001	0,22
2002	0,29
2003	0,24
2004	0,50
2005	0,57
2006	0,59
2007	1,00
2008	1,31
2009	0,71
2010	0,75
2011	1,01
2012	1,07
2013	0,94

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (1998-2013)

A metodologia aplicada aqui será similar a feita em PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON (2016), onde o crescimento dos equipamentos de refrigeração comercial acompanha o PIB do setor de serviços. Neste trabalho, entretanto, para compreender como as vendas futuras de tais aparelhos irão se comportar para os próximos anos, analisou-se a sensibilidade das vendas frente ao PIB do setor de serviços.

A elasticidade, por definição, é a medida adimensional de sensibilidade entre duas variáveis, como, por exemplo, a quantidade demandada de veículos *versus* a renda,

sendo definida pela Equação 4-11, conhecida como elasticidade renda da demanda (SCHAEFFER & SZKLO 2008 APUD MACHADO 2016).

Equação 4-11 Elasticidade renda da demanda

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta q/q}{\Delta r/r}$$

Sendo ε_r , a elasticidade renda da demanda; q , a quantidade de aparelhos vendidos; Δq , a variação de aparelhos vendidos; r , a renda; e Δr , a variação na renda. Ao olhar a equação descrita acima, é trivial constatar que a elasticidade renda da demanda é o percentual que a demanda varia em relação a variação percentual da renda.

Para estimar esta elasticidade, utilizou-se como demanda a quantidade de aparelhos vendidos entre 1998 e 2013, apresentados na Tabela 26 e definiu-se a renda como o PIB do setor de serviço. Assumindo a elasticidade como constante, a função linearizada que descreve a demanda de um determinado produto com a renda, conforme pode ser visto na Equação 4-12:

Equação 4-12 Função linearizada das vendas em relação a renda

$$\ln(vendas) = \alpha + \beta \times \ln(PIB_{serviço}) + erro$$

Nesta equação, α corresponde ao coeficiente linear da reta e β , o coeficiente angular. Derivando ambos os lados da Equação 4-12, e rearranjado os fatores, é possível constatar que β corresponde a elasticidade, ε_r .

Em relação aos equipamentos em si, devido à falta de detalhes na Pesquisa Industrial Anual, assumiu-se que 90% dos equipamentos utilizam HFC-134a, sendo o restante HFC-404a com uma carga média de 0,4kg por equipamento, uma taxa de vazamento igual a 15% e ao final de 10 anos (PUROHIT ET AL. 2016; MCTI 2016), o equipamento seria sucateado vazando uma quantidade de fluido equivalente a 100% da sua carga inicial (PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016).

4.6 Ar condicionado domiciliar

Para caracterizar o mercado nacional de ar condicionados domiciliares utilizou-se como base as razões de aparelhos de ar condicionado por domicílio encontradas na literatura: 0,07 em 2000 (IBGE 2002), 0,16 em 2005 (ELETROBRAS/PROCEL 2007) e 0,23 em 2013 (EPE 2015b), para os anos em que não há informação, entre 2001 a

2004 e 2006 a 2012, as posses médias são o resultado do crescimento linear entre os valores dos anos que possuem dados disponíveis, tais razões podem ser vistas na Tabela 27. Com base nessas relações, pode-se observar que o crescimento da quantidade destes equipamentos nas residências brasileiras foi, em média de 15% ao ano.

Tabela 27 Quantidade de aparelhos de ar condicionado entre 1995 e 2013

Ano	Quantidade de aparelhos de ar condicionado (milhões)	Posse média de aparelhos por domicílio
2000	3,29	0,07
2001	4,00	0,09
2002	4,77	0,10
2003	5,76	0,12
2004	7,09	0,14
2005	8,48	0,16
2006	9,14	0,17
2007	9,87	0,18
2008	10,56	0,18
2009	11,23	0,19
2010	12,04	0,20
2011	12,90	0,21
2012	13,72	0,22
2013	14,60	0,23

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2002); ELETROBRAS/PROCEL (2007); EPE (2015b)

A metodologia utilizada para se estimar o desenvolvimento do setor de ar condicionado residencial é similar a utilizada no setor de refrigeração doméstica, apresentada em MCNEIL ET AL. (2008). A posse média desse tipo de equipamento, também corresponde a uma função em forma de 'S', entretanto, neste caso a difusão é uma função apenas da renda *per capita*, como mostra a Equação 4-13:

Equação 4-13 Difusão de ar condicionados nos domicílios

$$Dif_{ACR} = \frac{\alpha_{ACR}}{1 + \gamma_{ACR} \times e^{\beta_{ACR} \times I}}$$

Sendo Dif_{ACR} , a posse média de aparelhos de ar condicionado nos domicílios; I , a renda *per capita*; e α_{ACR} , a difusão máxima destes equipamentos, que é definida por uma função de grau-dia de resfriamento (em inglês, *Cooling Degree Days* - CDD) (MCNEIL ET AL. 2008), apresentada na Equação 4-14:

Equação 4-14 Difusão máxima de aparelhos de ar condicionado em residências

$$\alpha_{arc} = 1 - 0,949 \times e^{-0,00187 \times CDD}$$

Para o Brasil, utilizou-se 2.015 graus-dia de resfriamento, de acordo com MCNEIL ET AL. (2013), que resulta em uma difusão máxima, α_{ACR} , de aproximadamente 98%. Tomou-se como premissa que tal valor permanecerá constante em todo período estudado.

Por fim, com o objetivo de encontrar os parâmetros, γ_{ACR} e β_{ACR} , da equação de difusão dos aparelhos de ar condicionados nos domicílios, linearizou-se da mesma maneira que foi feita anteriormente para aparelhos de refrigeração doméstica: rearranjou-se a equação e aplicou-se o logaritmo em ambos os lados, como pode ser visto na Equação 4-15:

Equação 4-15 Forma linearizada da equação da difusão de ar condicionados em domicílios

$$\ln \left(\frac{\alpha_{ACR}}{Dif_{ACR}} - 1 \right) = \ln \gamma_{ACR} + \beta_{ACR} \times I + \varepsilon$$

Em relação às vendas de aparelhos de ar condicionado residenciais, a Pesquisa Industrial Anual (IBGE 1998-2013) não diferencia os equipamentos residenciais dos comerciais, tão pouco diferencia o tipo de equipamento, isto é, se ele é um equipamento *split* ou de janela. Foi assumido, então que 70% dos equipamentos vendidos são para o setor residencial e 30% para o comercial, e 50% corresponde a equipamentos de janela e 50%, a *split*, tanto para a série histórica como para projeções futuras, com base em NOGUEIRA ET AL. (2015). Estas vendas são apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28. Vendas de aparelhos de ar condicionado totais e para o setor residencial.

Ano	Vendas de aparelhos de ar condicionado (milhão)	Vendas de aparelhos de ar condicionado residencial (milhão)
1998	1,17	0,82
1999	0,98	0,68
2000	1,95	1,36
2001	1,27	0,89
2002	1,15	0,81
2003	1,27	0,89
2004	1,19	0,83
2005	1,27	0,89
2006	1,57	1,10
2007	1,42	0,99
2008	1,50	1,05
2009	1,58	1,10
2010	3,05	2,13
2011	3,09	2,16
2012	3,58	2,50
2013	6,02	4,21

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (1998-2013); NOGUEIRA ET AL. (2015)

Em relação à utilização de HFCs no setor de ar condicionado residencial, apenas em 2015 começou a se substituir HCFCs por HFCs, de acordo com o Programa Brasileiro de Eliminação de HCFCs (MMA 2016b). Desta forma, assumiu-se que todo HCFC eliminado foi substituído por R-404a, fluido geralmente utilizado neste setor (PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016). A percentagem de equipamentos que utilizam R-404a é apresentada Tabela 29.

Tabela 29. Percentagem de R-404a nos equipamentos de ar condicionado entre 2015 e 2040

Ano	Percentagem de R-404a nos equipamentos de ar condicionado
2015	10%
2020	35%
2025	67,5%
2030	97,5%
2040	100%

Fonte: Elaboração própria com base em MMA (2016b)

Por fim, a carga média que se utilizou em cada equipamento foi de 0,75 kg para equipamento de janela e 1,5 kg para equipamentos tipo *split*; o tempo de vida destes equipamentos foi considerado como 10 anos, considerando que toda carga é vazada ao fim deste período; e uma taxa de vazamento de 12% ao ano (PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016; MCTI 2016).

4.7 Ar condicionado comercial

As informações sobre a utilização de ar condicionado no setor comercial brasileiro são escassas. Como visto na sessão anterior, referente a estes equipamentos no contexto residencial, os dados de venda de equipamentos não são discriminados quanto ao tipo de equipamento ou para qual setor estes equipamentos são vendidos. Para agravar esta situação, diferentemente do setor domiciliar, não há dados sobre a quantidade total de equipamentos de ar condicionado em uso.

Em MCNEIL ET AL. (2008) é desenvolvida uma metodologia que correlaciona a área em $m^2/empregado$ do setor comercial e o PIB *per capita*, entretanto utilizando um conjunto maior e mais diversificado de países (dentre eles o Brasil), como também apresenta um limite máximo de saturação desta área, conforme a Equação 4-16.

Equação 4-16. Área em $m^2/empregado$ em função da renda *per capita*

$$\text{Área} \left(em \frac{m^2}{empregado} \right) = \frac{70}{1 + 5,2383 \times e^{-0,00011285 \times I}}$$

Onde, o valor 70 representa a área máxima por empregado, e I , a renda em PIB *per capita* em dólares de 2005.

Para saber a área total comercial é necessário estimar o número de indivíduos empregados que trabalham neste setor. A fim de saber esta quantia, foi utilizada a seguinte metodologia, similar a vista em MCNEIL ET AL. (2013): o número de indivíduos empregados no setor comercial é dado pela População Economicamente Ativa (PEA)¹⁶,

¹⁶ A População Economicamente Ativa consiste na soma das pessoas ocupadas e desocupadas contidas na População em Idade Ativa. Define-se como pessoa ocupada, como indivíduos que exercem

taxa de desemprego e a parcela do setor de serviços no PIB, como mostra a Equação 4-17:

Equação 4-17. Número de indivíduos que trabalham no setor comercial

$$N_c = PEA \times PIB_c \times (1 - Taxa\ de\ Desemprego)$$

Sendo N_c , o número de indivíduos que trabalham no setor comercial; PIB_c , a participação do setor de serviços relativa ao PIB; e a População Economicamente Ativa (PEA), uma função da produto da População em Idade Ativa (PIA)¹⁷ e a Taxa de Atividade (IBGE 2017), apresentada na Equação 4-18:

Equação 4-18. População economicamente ativa

$$PEA = PIA \times Taxa\ de\ Atividade$$

Os dados históricos referentes a População em Idade Ativa desde 1990 bem como sua projeção até 2050 foram obtidos de IBGE (2008). Para a Taxa de Atividade, esta é proveniente da Organização Internacional do Trabalho (2011), entre os anos 1990 e 2020, assumindo que este valor permanecerá constante até 2050, pois entre 2000 e 2020 esta taxa não apresenta variações significativas. A parcela do setor de serviço no PIB entre 1990 e 2015 foi obtida das Contas Nacionais Trimestrais (IBGE, 2016d) e projetada para crescer na mesma taxa que a apresentada em EPE¹⁸ (2015). Por fim, a taxa de desemprego para o período entre 1990 e 2020 é proveniente de FMI (2016) e para projeta-la até 2050, reproduziu-se a tendência de redução apresentada entre 2017 a 2020 até 2050. Esta premissa mantém uma média da taxa de desemprego para o período de 2020 a 2050 de 7,79%, próxima a média entre 1990 e 2020, 7,75%. A Tabela 30 apresenta, de forma resumida estes dados históricos e suas projeções até 2050.

trabalho, seja ele remunerado ou não, e desocupada como pessoas que não possuem trabalho, mas estavam dispostas a trabalhar (IBGE 2016b).

¹⁷ População em Idade Ativa é o conjunto etário que abrange a População Economicamente Ativa e a População Economicamente Inativa, considerado como idade limite, 15 anos (IBGE 2016b, IBGE 1995-2013).

¹⁸ Utilizou a taxa em que proporção do PIB do setor de serviços crescerá e não a proporção em si pois a mesma cresce de 67,3% em 2013 a 69,5% em 2050. Da forma que a parcela relativa do PIB do setor de serviço já registrado nos últimos anos, que em 2015 atingiu a quantia de 72% (IBGE 2016a)

Tabela 30. Dados da População em Idade Ativa, Taxa de Atividade, Taxa de desemprego e a participação do setor de serviço em relação ao PIB entre o período de 1990 e 2050.

Ano	População em Idade Ativa (% da população total)	Taxa de Ocupação (%)	Taxa de desemprego (%)	Participação do setor de serviço em relação ao PIB (%)
1990	64	65	4,28	69
2000	70	68	7,10	68
2010	74	70	6,75	67
2020	79	69	10,04	72
2030	82	69	8,41	72
2040	84	69	7,04	73
2050	86	69	5,89	73

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2008); IBGE (2016d); OIT (2011); FMI (2016)

Será adotada a mesma razão da quantidade de HFC-404a por m² utilizada em PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON (2016) de 0,02 kg/m² e manteve-se a premissa do setor de ar condicionados residenciais no que se refere ao percentual de substituição de HCFCs por HFCs, apresentadas na Tabela 29 devido ao Plano de Eliminação de HCFCs (MMA 2016a). Em relação à taxa de vazamento, esta foi considerada como 12%, valor consonante com o utilizado em PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON (2016).

Para finalizar, como não há informações detalhadas a respeito da entrada de novos equipamentos de ar condicionado neste setor, não se poderia estimar o ano em que estes aparelhos são sucateados e assim a quantidade emitida em seu fim de vida. A fim de contornar esta situação, dado que estes equipamentos são similares aos residenciais, adotou-se que a quantidade de fluido fluorado vazado ao sucateamento acontece na mesma proporção que o setor de ar condicionado doméstico em relação a sua carga total.

4.8 Ar condicionado veicular

A metodologia que será utilizada para estimar o desenvolvimento futuro dos equipamentos de ar condicionados veiculares consiste em três etapas: primeiro, será calculada a elasticidade renda da demanda através da correlação entre o licenciamento de novos veículos e o PIB, que permitirá estimar as vendas futuras, baseado na dissertação de mestrado de MACHADO (2016). Posteriormente, com base no tempo de vida dos veículos, será possível calcular a quantidade total de equipamentos de ar condicionado veicular. Por fim, sabendo as cargas de HFCs nos aparelhos de ar

condicionado para cada tipo de veículo, será possível estimar as emissões relacionadas ao vazamento durante o uso e ao fim de vida.

O cálculo da elasticidade renda da demanda será feito da mesma maneira que na seção de aparelhos de refrigeração comercial: com base na Equação 4-12, a regressão linear do logarítmico natural do licenciamento de novos veículos e da renda (PIB), é possível calcular o valor de sua elasticidade.

O Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (ANFAVEA 2016) provê a quantidade de automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus novos licenciados desde 1960 apresentada na Figura 25 e desmembrado na Figura 26. Já os valores do PIB utilizados para fazer a regressão linear foram apresentados anteriormente na Figura 22.

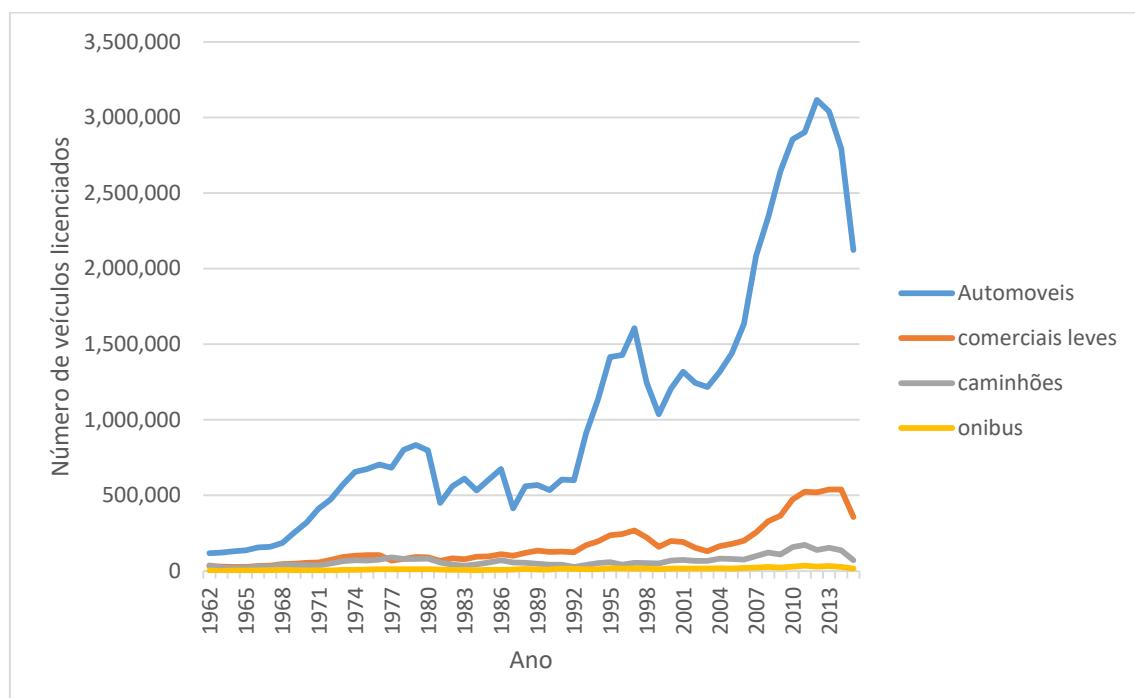


Figura 25. Licenciamento de novos veículos em território nacional entre 1962 e 2015

Fonte: elaboração própria com base em ANFAVEA (2016)

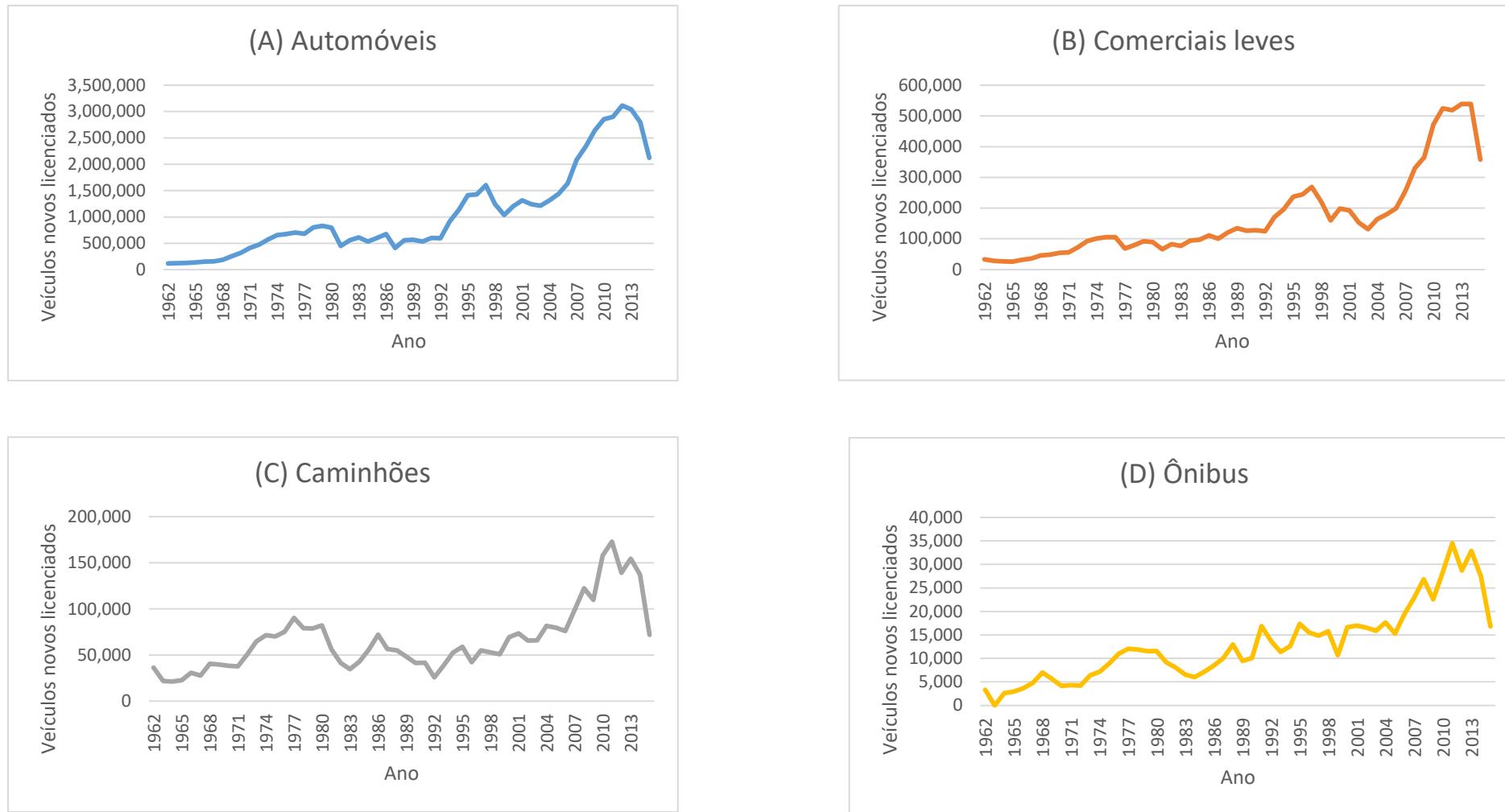


Figura 26. Licenciamento de veículos novos entre 1962-2016 no Brasil: (A) automóveis; (B) comerciais leves; (C) Caminhões; (D) Ônibus

Fonte: Elaboração própria com base em ANFAVEA (2016)

Agora que já é possível estimar a quantidade de veículos novos licenciados por ano, é necessário saber a quantos veículos são sucateados anualmente. Para os ônibus e caminhões, devido à escassez de informações, optou-se por adotar uma vida útil de 20 anos (CHATURVEDI ET AL. 2015; PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016). Já para os automóveis e comerciais leves, através das informações a respeito da curva de sucateamento destes veículos (MCTI 2015a), é possível definir mais precisamente a quantidade de equipamentos que chega ao seu fim de vida em cada ano estudado. A Figura 27 apresenta a percentagem de automóveis e comerciais leves que são sucateados por ano de vida.

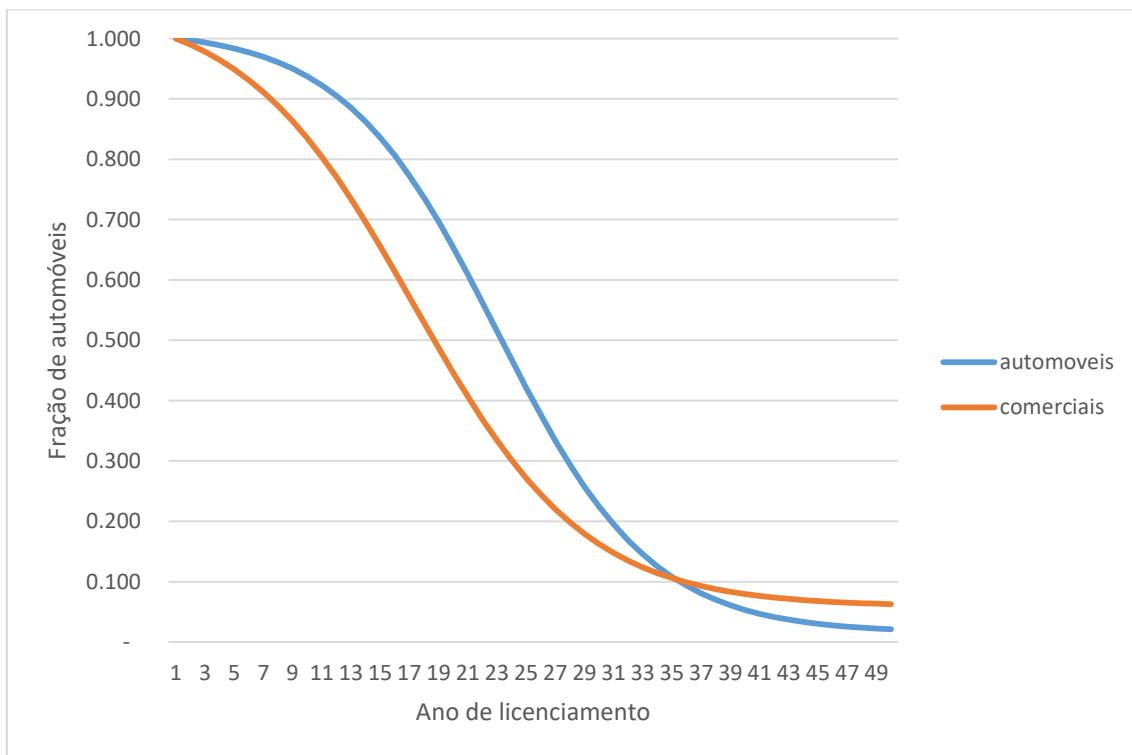


Figura 27. Curva de sucateamento para Automóveis e Comerciais leves

Fonte: elaboração própria com base em MCTI (2015a)

Sabendo a quantidade de veículos novos licenciados e a quantidade destes que são sucateados anualmente, as suas frotas podem ser definidas pela equação Equação 4-19.

Equação 4-19. Frota de veículos novos

$$Frota_{i,t} = \sum_{j=1960}^t Vendas_{i,j} \times (1 - S(t - j))$$

Sendo a $Frota_{i, t}$ o total de veículos i (automóveis, comerciais leves, ônibus ou caminhões) que circulam no ano t ; $Vendas_{i, j}$ a quantidade de veículos i vendidos no ano j ; e $(1 - S(t - j))$ a quantidade de veículos que ainda não foram sucateados.

O ano inicial utilizado para início das emissões foi 1996, onde os veículos começaram a utilizar HFCs, mais especificadamente o HFC-134a, no lugar do CFC-22 (MCTI 2015a). Na Figura 28 é apresentada percentagem de novos veículos licenciados com ar condicionado, com exceção dos ônibus, entre 1990 e 2009 e com base na regressão linear deste percentual, estimou-se o seu crescimento até atingir 100% dos novos veículos licenciados.

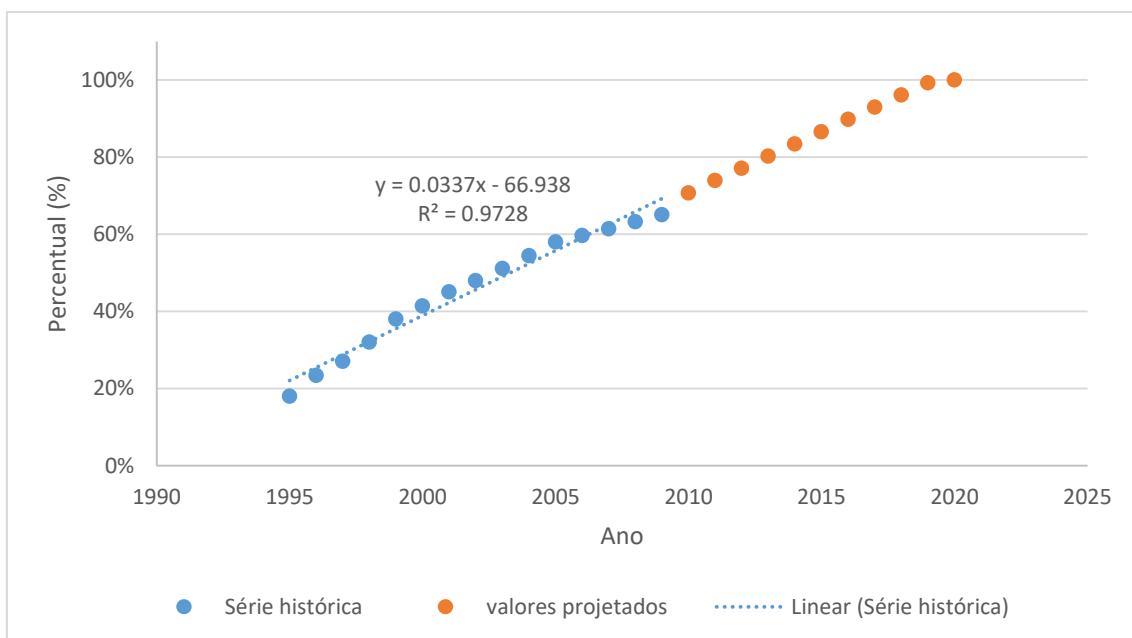


Figura 28. Percentual de automóveis, comerciais leves e caminhões com ar condicionado entre 1990 e 2020

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015a)

Para os ônibus, estes foram segregados em urbanos e rodoviários, tomando como premissa que para todo o período estudado, a proporção vista entre 1996 e 2009 de 60% de ônibus urbanos e 40% de rodoviários será mantida (MCTI, 2015a). Isto será feito devido a diferença do percentual de veículos com ar condicionado: para os veículos rodoviários a partir de 1995 todos já continham sistemas de ar condicionado e em relação aos urbanos apenas 3% destes veículos possuíam sistemas de condicionamento de ar (MCTI, 2015a).

Como fora apresentado no Seção 3.2, há uma tendência de que esta parcela de equipamentos de ar condicionado em ônibus urbanos aumente. Como premissa para o crescimento deste percentual, assumiu-se que ele crescerá a uma taxa constante e utilizou-se como horizonte valor de 50% dos ônibus urbanos com ar condicionado em 2050, valor próximo a percentagem apresentada (53%) em CHATURVEDI ET AL. (2015), que em seu relatório desenvolve um cenário de crescimento da parcela de ar condicionado em ônibus urbanos para a Índia. Os valores do percentual destes veículos urbanos no Brasil são apresentados na Figura 29.

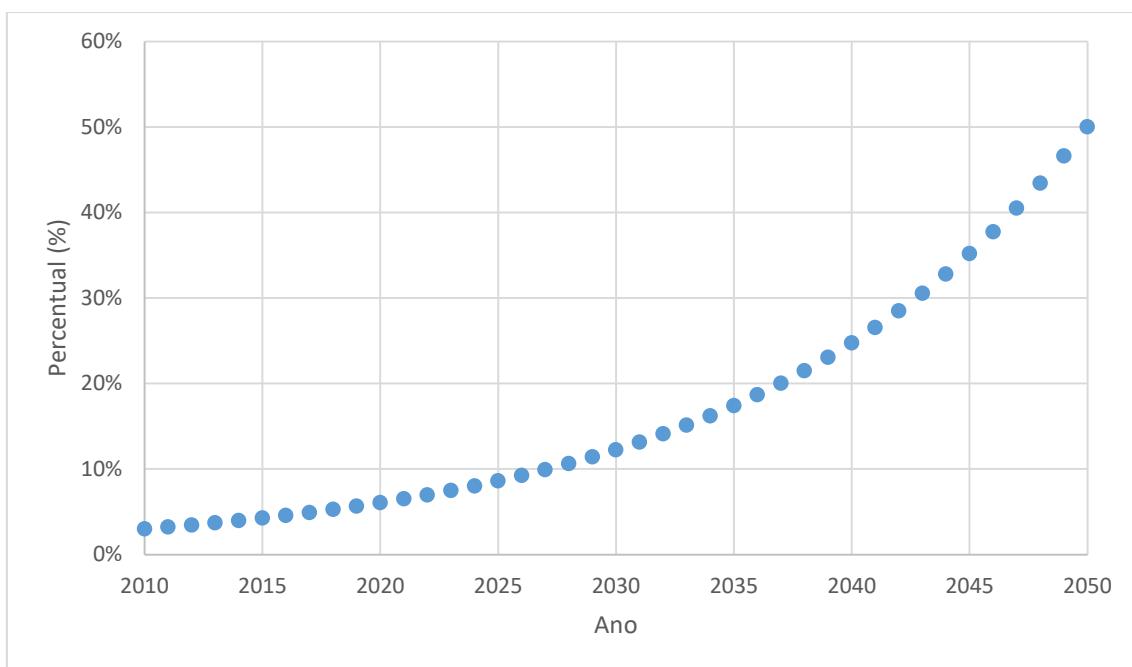


Figura 29. Percentual de ônibus urbanos licenciados com ar condicionado

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015a); CHATURVEDI ET AL. (2015)

Em relação aos caminhões frigoríficos, devido à ausência de informações assumiu-se que a sua proporção dentre os caminhões licenciados de 1,63% no ano de 2009 (MCTI 2015a) permaneceu constante ao longo do período estudado. Além dos próprios aparelhos de ar condicionado nestes caminhões, é preciso caracterizar a carga de seu transporte refrigerado: cerca dos caminhões frigoríficos 80% possuem HFC-134a e 20%, R-404a.

As especificações em relação a taxa de vazamento, carga e tempo de vida, com exceção dos automóveis e comerciais leves, que possuem curvas de sucateamento para descrever este comportamento, de todos os veículos estudados são apresentadas na Tabela 31:

Tabela 31. Informações a respeito da carga, taxa de vazamento e tempo de vida de diversos veículos

Veículo	Carga média (Kg)	Taxa de vazamento (%)	Tempo de vida (anos)
Automóveis	0,8	10	-
Comerciais leves	0,8	10	-
Ônibus	5	20	20
Caminhões	1,2	10	20
Caminhões frigoríficos	4,5 (HFC-134a) 6,0 (R-404a)	30	20

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015a); CHATURVEDI ET AL. (2015)

4.9 Bebedouro

As informações históricas dos bebedouros, assim como em MCTI (2015a), se resumem à quantidade vendida do grupo de equipamentos intitulado “Unidades fornecedoras de água ou sucos, inclusive bebedouros” na Pesquisa Industrial Anual (IBGE 1998-2013). Assume-se, que por estarem na seção a respeito de aparelhos de refrigeração comercial, todos estes equipamentos possuem fluido refrigerante, com uma carga de 0,05 kg por aparelho.

Como as informações deste setor são escassas e não permitem uma modelagem precisa, optou-se por aplicar a mesma taxa de crescimento que a dos outros equipamentos de refrigeração comercial.

Em relação as emissões de bebedouros, considerou-se que a taxa de vazamento anual corresponde a 10% da carga original em cada aparelho e que ao final da sua vida útil, de 15 anos, a quantidade de fluido refrigerante emitida será equivalente a 100% da carga original.

4.10 Outros usos de HFCs

Em relação aos outros usos de HFCs, como produção de espuma, solventes, extintores de incêndio e aerossóis, optou-se por ignorá-los devido sua baixa contribuição nas emissões destes gases e nenhuma evidência de que tais usos possam vir a ter uma contribuição significativa nas emissões de gases fluorados no Brasil (MCTI, 2015a).

4.11 SF₆ em equipamentos de distribuição e transmissão elétrica

No que diz respeito aos equipamentos de distribuição e transmissão elétrica, não existem informações detalhadas disponíveis sobre a sua quantidade e o seu sucateamento (MCTI 2015a). Todavia, a metodologia apresenta em PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON (2016) permite contornar esta situação. Os autores utilizam fatores de emissão de hexafluoreto de enxofre, em kg por kWh consumido, disponíveis pela *California Environmental Protection Agency* (2016) entre o período de 2000 e 2014, como pode ser visto na Tabela 32.

Tabela 32. Fatores de emissão de SF₆ por ano em kg/kwh entre 2000 e 2014

Ano	Fator de emissão de SF ₆ (kg/kWh)
2000	5,04E-05
2001	5,13E-05
2002	4,77E-05
2003	4,54E-05
2004	4,45E-05
2005	4,37E-05
2006	4,07E-05
2007	3,73E-05
2008	3,76E-05
2009	3,81E-05
2010	3,64E-05
2011	3,63E-05
2012	3,47E-05
2013	2,67E-05
2014	1,92E-05

Fonte: Elaboração própria com base em CEPA (2016)

Como pode ser observado, há uma tendência da redução das taxas de emissões de hexafluoreto de enxofre. Isto ocorre devido a uma política que fora implementada em 2000 pela USEPA e membros da indústria de energia elétrica com o intuito de reduzir as emissões do gás fluorado nos equipamentos de geração e transmissão de energia elétrica (USEPA 2016a). Tendo em vista que no Brasil não houve uma implementação

de medidas similares, optou-se por utilizar o fator de emissão pré-política de redução das fugas de SF₆ na série histórica apresentada acima, $5,04 \times 10^{-5}$ kg de SF₆/kWh¹⁹.

Com esta taxa, para calcular as emissões de hexafluoreto de enxofre até 2050, só falta a informação a respeito do consumo de energia elétrica até este ano. EPE (2016) apresenta valores para o consumo de energia elétrica até 2050 e para dados históricos, entre 1990 e 2015, os mesmos foram obtidos de EPE (2015a; 2006). Esses valores podem ser vistos na Figura 30.

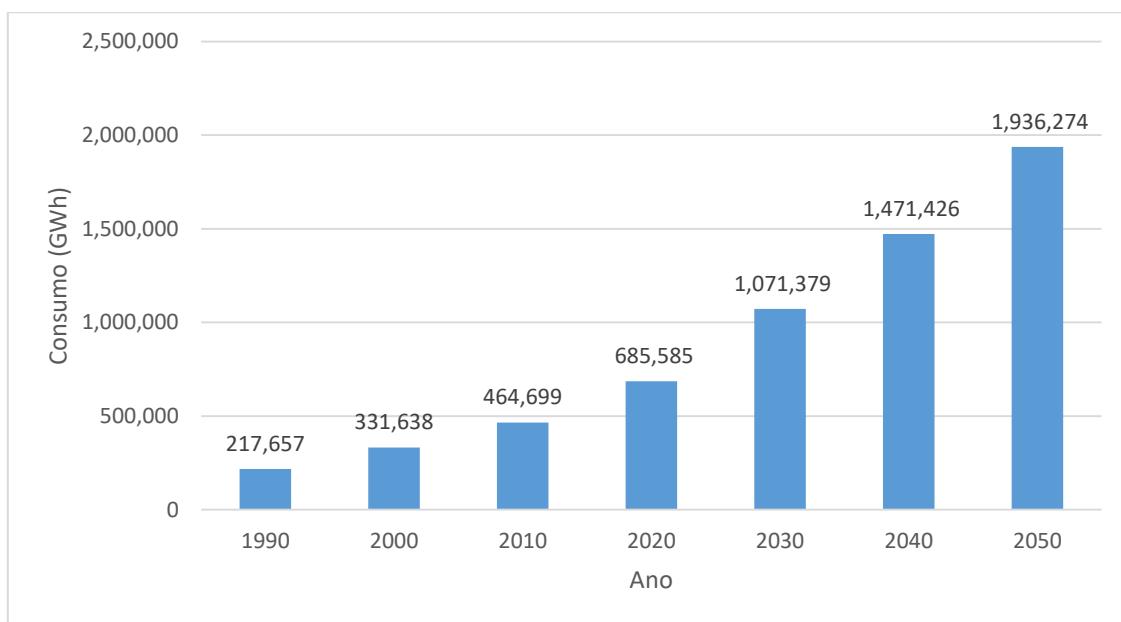


Figura 30. Consumo de energia elétrica no Brasil entre 1990 e 2050

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2015a; 2006; 2016)

4.12 Produção de alumínio

Apesar da expectativa de que o consumo de alumínio no Brasil aumente nas próximas décadas, não se espera que a produção acompanhe esta tendência. Isto não em função da oferta de matéria prima, mas pelos custos altos de energia elétrica, que podem chegar a até 40% do custo de produção (EPE 2015b). Sendo assim, será assumido que até 2050 a produção de alumínio primário no Brasil permanecerá constante, sendo utilizada a média entre 2005 e 2010 como o valor da produção no período estudado. A

¹⁹ Não foi utilizada a taxa de vazamento apresentada pelo Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCTI 2015a), de 2% ao ano, visto que este valor parece otimista diante da série histórica apresentada.

série histórica da produção de alumínio, obtida de MCTI (MCTI 2015c), bem como a sua projeção é apresentada na Figura 31.

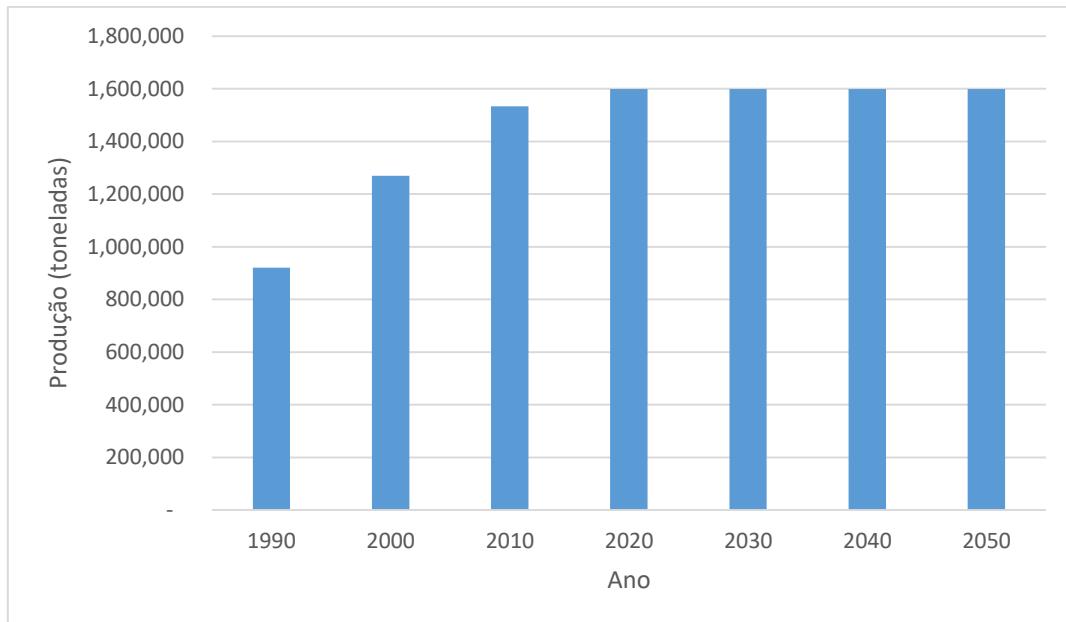


Figura 31. Produção de alumínio primário no Brasil entre 1990 e 2050

Fonte: Elaboração própria com base em (MCTI 2015c; EPE 2015b).

Dado que as emissões de gases fluorados na produção de alumínio primário são relativas ao tipo de tecnologia utilizada (HARNISCH & HENDRIKS 2000), é preciso especificar o quanto da produção de alumínio é proveniente de cada tipo de equipamento.

Como fora mencionado, a produção deverá se manter constante, então também será conservada a proporção da utilização de cada tecnologia no processo de produção deste metal. A Tabela 33 apresenta proporção média entre 1990 e 2010 que cada tecnologia contribuiu para a produção de alumínio primário.

Tabela 33 Percentual de tecnologia utilizada na produção de alumínio primário no Brasil

VSS	HSS	CWPB
30%	6%	64%

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015c)

Por fim, para estimar a emissão de CF_4 e C_2F_6 , utilizaram-se fatores de emissão por tipo de tecnologia em kg de gás fluorado por tonelada de alumínio produzido. Estas taxas são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 Fatores de emissão por tecnologia utilizada

Tecnologia	Fatores de emissão por tecnologia	
	kg CF4/t Al	kg C2F6/t Al
CWPB	0,4	0,04
VSS	0,8	0,04
HSS	0,4	0,03

Fonte: Elaboração própria com base em MCTI (2015c)

4.13 Cenários de mitigação

Os cenários de mitigação das emissões de gases fluorados serão elaborados com base em políticas já implementadas na União Europeia, pois elas são, dentre todas, as medidas de controle mais elaboradas a fim de mitigar gases fluorados causadores de efeito estufa. Optou-se por utilizar três regulamentos europeus: o regulamento 842/2006, a diretiva 2006/40 e o regulamento 517/2014, pois estas políticas focam na implementação das principais medidas de controle de gases fluorados causadores de efeito estufa: a redução do vazamento, o recolhimento ao fim de vida e a substituição por um fluido de menor GWP (PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON 2016).

O regulamento europeu 842/2006, de maio de 2006, tem como objetivo proteger o meio ambiente através da redução das emissões de gases fluorados protegidos pelo Protocolo de Quioto. Para tal, esta política conta com duas medidas: a primeira consiste na redução de vazamento de compostos fluorados através da implementação de novas tecnologias nos equipamentos de ar condicionado estacionário, refrigeração, comutadores de alta tensão, sistemas de proteção contra incêndios e extintores, aparelhos que contenham solventes a base de gases fluorados; a segunda visa a recuperação dos fluidos fluorados nestes mesmos equipamentos, garantindo o seu destino adequado seja a reciclagem, regeneração ou a destruição (COMISSÃO EUROPEIA 2006b).

Oito anos após o regulamento 842/2006, os Estados Membros da União Europeia implementaram uma nova política, o regulamento 517/2014, com o mesmo objetivo que a primeira, entretanto, mais rígida. Além da redução das fugas, da coleta e destinação adequada de compostos fluorados causadores de efeito estufa, são instauradas restrições em relação a utilização de certos fluidos fluorados que possuam

GWP elevado (COMISSÃO EUROPEIA 2014). As datas da substituição do gás fluorado e o limite do valor do GWP dos fluidos substitutos é apresentada na Tabela 35.

Tabela 35 Datas para a implementação de substitutos de menor GWP em cada setor e o seu valor limite

Setor	Limite do valor de GWP que poderá ser utilizado	Data
Refrigeradores e geladeiras domésticas	GWP < 150	2015
Refrigeradores e geladeiras comerciais	GWP < 2500	2020
	GWP < 150	2022
Ar condicionado residencial	GWP < 150	2020
Ar condicionado comercial	GWP < 150	2020
Ar condicionado veicular	GWP < 150	2015

Fonte: Elaboração própria com base em COMISSÃO EUROPEIA (2014)

Já a diretriz 2006/40 de maio de 2006 trata apenas da utilização de refrigerantes fluorados nos equipamentos de ar condicionado veicular, setor que não fora abordado em nenhuma dos outros regulamentos supracitados e abrange aspectos de ambos: a redução das taxas de fugas e a utilização de fluidos refrigerantes com GWP inferior a 150.

Utilizando as informações explicitadas acima serão feitos três análises de medidas de mitigação. A primeira, que se baseia nas medidas apresentadas no regulamento 814/2006 e na diretriz 2006/40, consistirá na implementação, a partir de 2017, de tecnologias que reduzam o vazamento de gases fluorados nos equipamentos dos principais grupos de equipamentos que os emitem, como também a sua recuperação. A segunda será desenvolvida utilizando a substituição dos gases fluorados por outros fluidos que apresentam menor GWP, como é apresentado na política europeia mais recente, o regulamento 517/2014, e na diretriz 2006/40. Por fim será analisado a redução das emissões quando as duas medidas, o controle de vazamento com recolhimento ao fim de vida e a substituição do refrigerante, são implementadas juntas a fim de analisar a quantidade a mais de gases fluorados que poderão ser abatidos e, consequentemente, a quantidade máxima que poderá ser abatida utilizando todas medidas possíveis.

As medidas de controle das emissões provenientes da produção de alumínio e dos equipamentos de transmissão e distribuição de energia elétrica não são tratadas em nenhum regulamento dentre os citados. Então, com base em PUROHIT & HÖGLUND-ISAKSSON (2016), as medidas de controle a serem utilizadas serão redução da taxa de vazamento e o recolhimento após fim de vida, este último apenas para os equipamentos do setor elétrico. A Tabela 36 apresenta as medidas de mitigação em cada cenário como também as datas em que elas deverão ser implementadas.

Tabela 36. Medidas de mitigação em cada cenário e seus anos de implementação

Setor	Medida de controle
Refrigeração doméstica	Redução da taxa de vazamento e recolhimento ao fim de vida
	Utilização de fluido com GWP inferior a 150
Refrigeração comercial	Redução da taxa de vazamento e recolhimento ao fim de vida
	Utilização de fluido com GWP inferior a 150
Ar condicionado residencial	Redução da taxa de vazamento e recolhimento ao fim de vida
	Utilização de fluido com GWP inferior a 150
Ar condicionado comercial	Redução da taxa de vazamento e recolhimento ao fim de vida
	Utilização de fluido com GWP inferior a 150
Ar condicionado veicular	Redução da taxa de vazamento e recolhimento ao fim de vida
	Utilização de fluido com GWP inferior a 150
Equipamentos elétricos	Redução da taxa de vazamento e recolhimento ao fim de vida
Produção de Alumínio	Redução da taxa de vazamento
Bebedouros	Redução da taxa de vazamento e recolhimento ao fim de vida
	Utilização de fluido com GWP inferior a 150

Fonte: elaboração própria

5. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das categorias de equipamentos que mais contribuem com as emissões gases fluorados no Brasil, como fora mencionado na sessão metodológica deste trabalho. Destacam-se, como principais resultados, as projeções das emissões brasileiras dos fluidos fluorados, o potencial e os custos de mitigação quando implementada medidas análogas as europeias.

5.1 Refrigeração Doméstica

Como fora explicado no capítulo 3, a metodologia para estimar as emissões do setor de refrigeração doméstica utiliza a posse média domiciliar destes equipamentos, sendo esta uma função da taxa de urbanização, eletrificação e do PIB *per capita* (Equação 4-8). A regressão linear resultou nos seguintes coeficientes apresentados na Tabela 37:

Tabela 37. Coeficientes da função da difusão de equipamentos de refrigeração doméstica

Equipamento	γ	β_1	β_2	β_3	R^2
Geladeiras	320,91	-1,76E-05	-7,50	0,017	0,9956
Freezers	3,92	2,17E-05	-2,78	2,85	0,4649

Fonte: Elaboração própria

Utilizando estes coeficientes e a Equação 4-7, foi estimada a posse média de geladeiras e *freezers* para ambos cenários de crescimento do PIB, o otimista e o conservador, entre 2015 e 2050. Os resultados da difusão dos equipamentos de refrigeração doméstica encontrados neste trabalho são congruentes com aqueles apresentados por EPE (2016). Aqui, a posse média em 2050, nos Cenários A e B respectivamente é 1,11 e 0,97, para geladeiras, 0,07 e 0,10, para *freezers*. Já em EPE (2016), a difusão de geladeiras e *freezers* é 1,03 e 0,12, respectivamente. Nas Figura 32 e Figura 33 podem ser vistos os desenvolvimentos das posses médias de tais equipamentos.

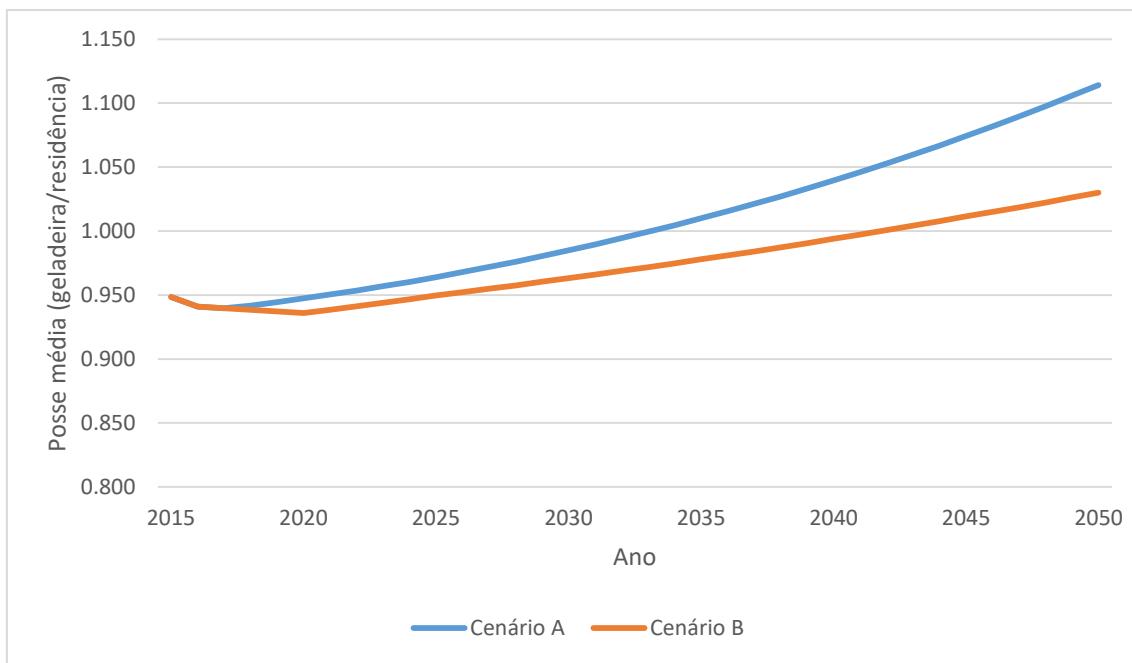


Figura 32. Posse média de geladeiras no Brasil entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B

Fonte: Elaboração própria

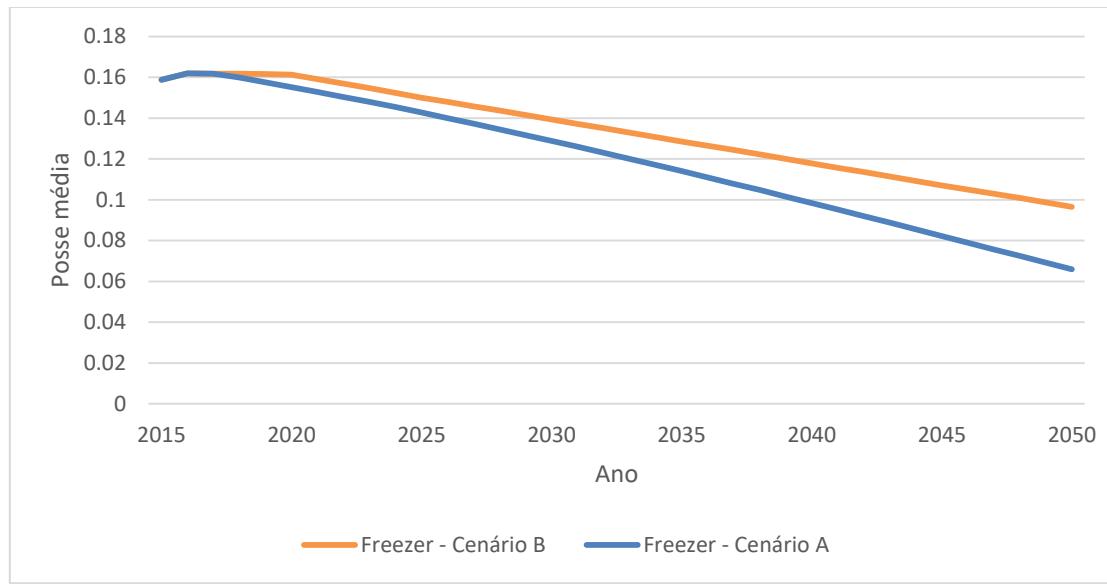


Figura 33. Posse média de freezers entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B

Fonte: Elaboração própria

A posse média por ano destes equipamentos foi multiplicada pelo número total de domicílios brasileiros em cada ano, resultando na quantidade total de aparelhos de refrigeração doméstica, podendo ser vista nas Figura 34 e Figura 35. A quantidade total de geladeiras aumenta, de 62 milhões de unidades em 2015, chegando a 101 milhões a 110 milhões em 2050, dependendo de cada crescimento do PIB. Para os *freezers*, houve

um descréscimo na quantidade total destes equipamentos nas residências brasileiras: saindo de 10 milhões de unidades em 2015 para 6,5 a 9,5 milhões de unidades em 2050.

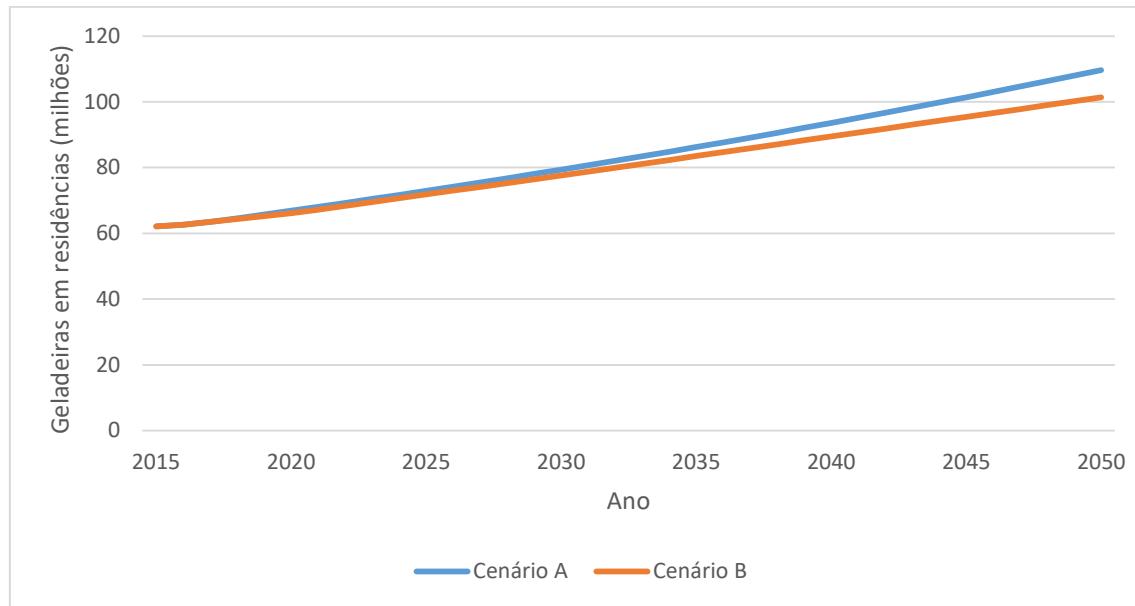


Figura 34. Quantidade total de geladeiras entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B

Fonte: Elaboração própria

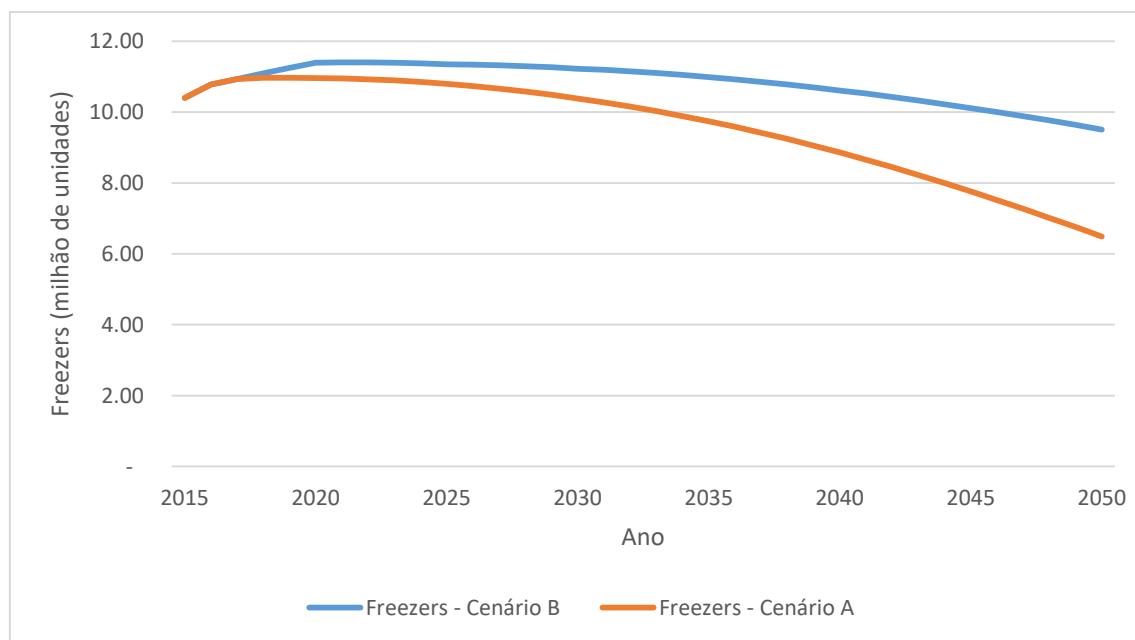


Figura 35. Quantidade total de freezers entre 2015 e 2050 para cenários de crescimento do PIB A e B.

Fonte: elaboração própria

Utilizando as quantidades totais de equipamentos de refrigeração em cada ano, a quantidade de aparelhos que entraram no mercado nacional (Tabela 25) e a Equação 4-10 é possível estimar a quantidade de aparelhos vendidos em cada ano a partir de

2015 e consequentemente a quantidade de aparelhos sucateados, dado que os aparelhos são sucateados 15 anos após sua venda.

As Figura 36 e Figura 37 apresentam os valores da venda de aparelhos de refrigeração a partir de 2015 até 2050 em ambos cenários de crescimento do PIB. Nestas figuras se pode observar o crescimento das vendas de geladeiras na refrigeração doméstica, de 4,46 milhões de unidades em 2015 para 9,21 milhões a 10,16 milhões de unidades em 2050. No caso dos *freezer*, as vendas anuais caem de pouco mais de um milhão de unidades em 2015 para 0,60 e 0,42 milhões de unidades nos cenários de menor e maior crescimento de PIB respectivamente.

Pode-se observar, na Figura 37 uma descontinuidade nas vendas de *freezers* do Cenário B. Isto ocorre devido a descontinuidade no PIB deste cenário entre o ano de 2020 e 2021, onde crescimento do PIB salta de 0,29% ao ano para 2,83%, como fora mostrado na Tabela 23.

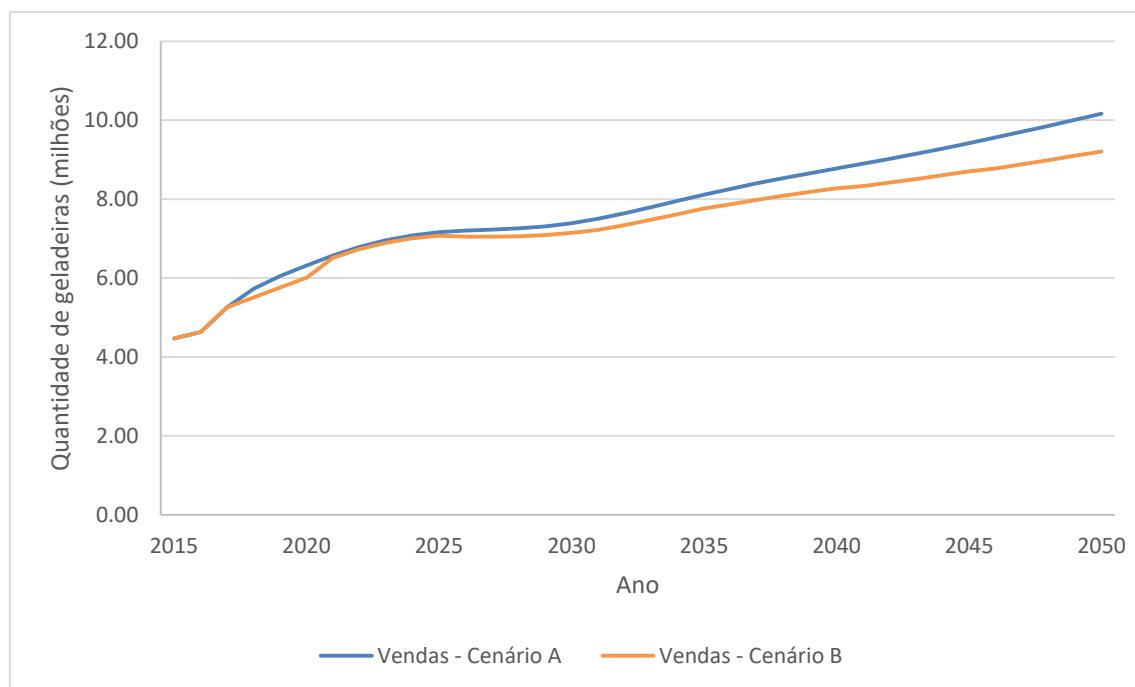


Figura 36. Quantidade de geladeiras vendidas para uso doméstico vendidas anualmente entre 2015 e 2050.

Fonte: Elaboração própria

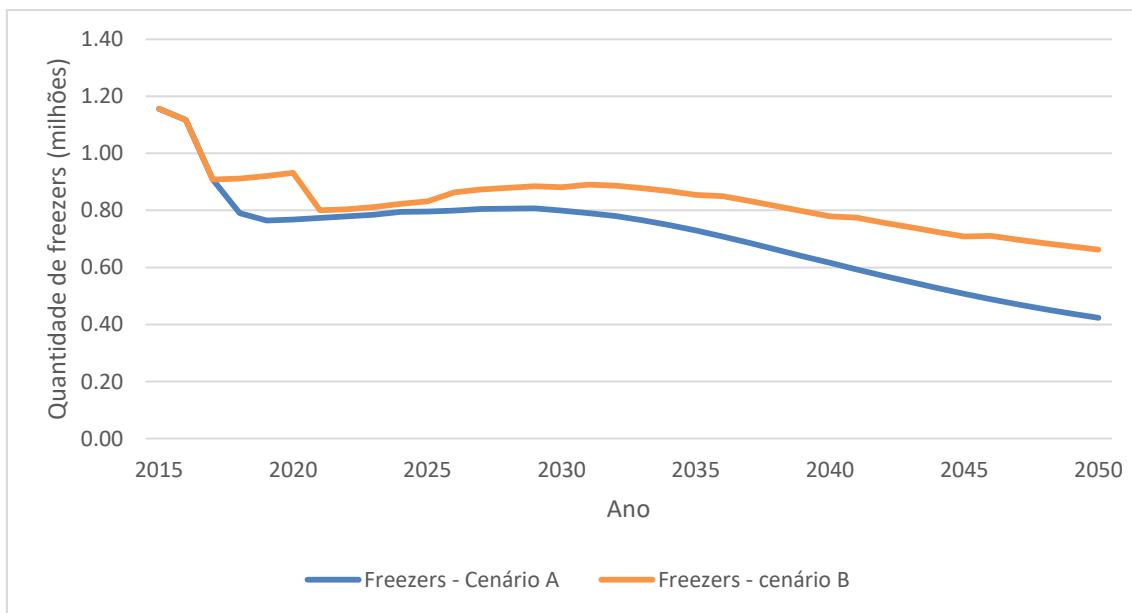


Figura 37. Quantidade de freezers para uso doméstico vendidos anualmente entre 2015 e 2050

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que as vendas de geladeiras em ambos os cenários são próximas, uma vez que a quantidade total destes equipamentos não apresenta grandes discrepâncias, como fora apresentado na Figura 34. Já para os *freezers*, a queda das vendas é um comportamento esperado, dado que a posse desses equipamentos deverá ser menor nos próximos anos.

Com a quantidade total, quantidade de novos equipamentos e a quantidade sucateada de aparelhos de refrigeração doméstica em cada ano, foram estimadas as emissões de gases fluorados para esta categoria utilizando suas respectivas taxas de vazamento e cargas. As Figura 38 e Figura 39 apresentam as emissões de HFC-134a, em Gg, no período entre 1999 a 2050, descrevendo as fugas provenientes do uso e do sucateamento para que se tenha uma maior compreensão a respeito das suas emissões.

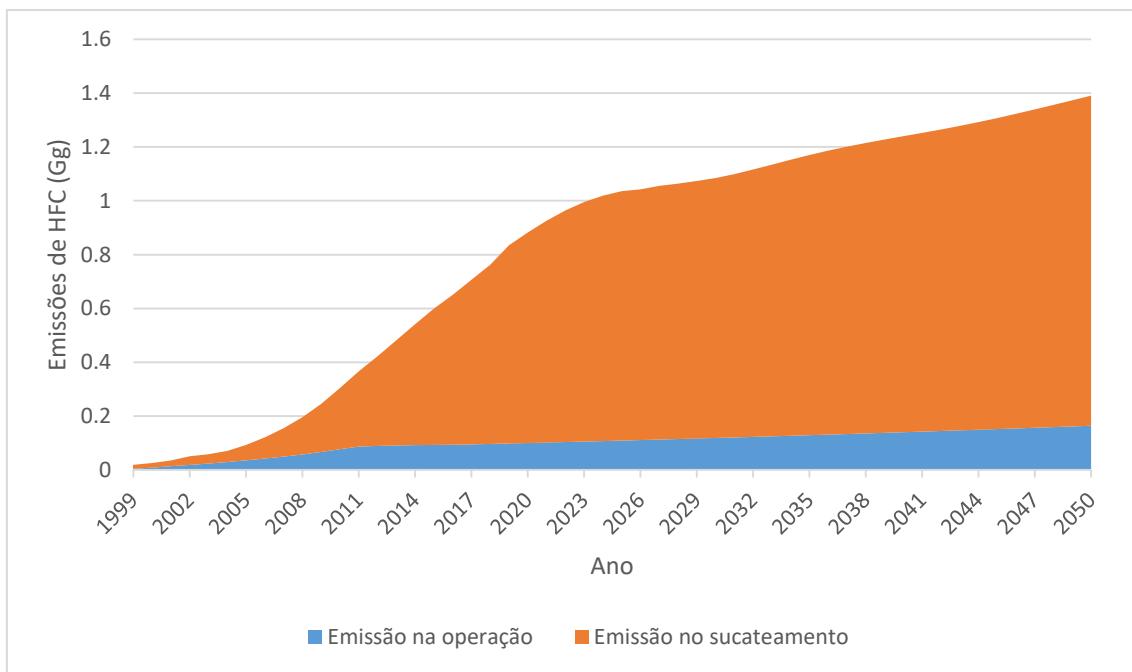


Figura 38. Emissões de HFC-134a no Cenário A (Refrigeração Doméstica)

Fonte: Elaboração própria

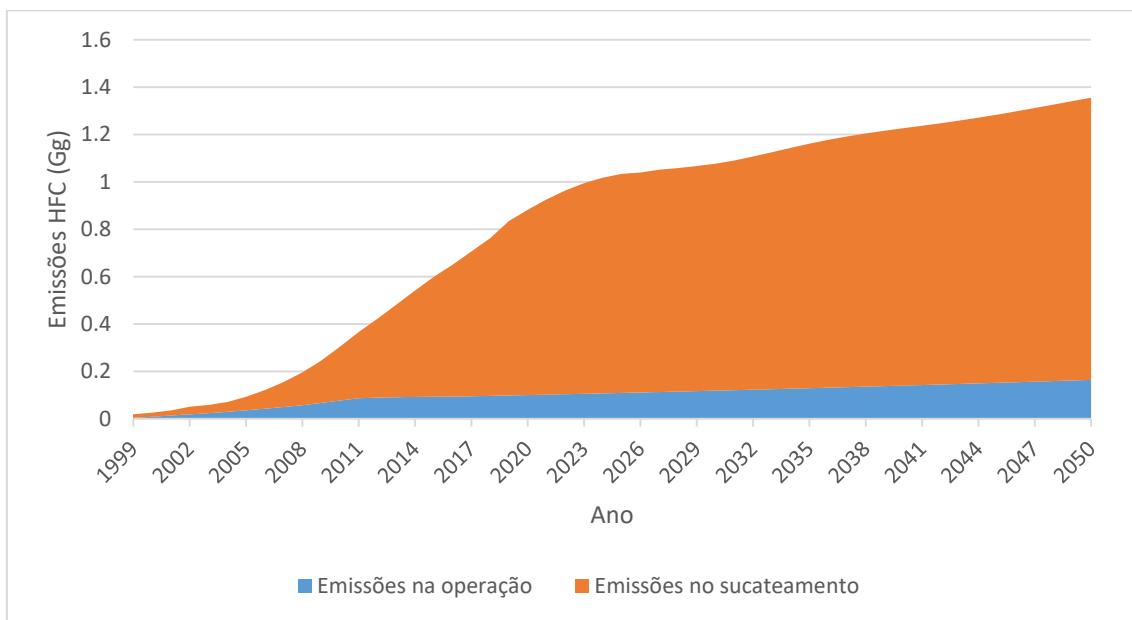


Figura 39. Emissões de HFC-134a no Cenário B (Refrigeração Doméstica)

Fonte: Elaboração própria

Como a taxa de vazamento nestes equipamentos é baixa, as emissões provenientes do uso dos mesmos são consideravelmente inferiores à aquelas relacionadas ao sucateamento dos aparelhos de refrigeração, durante o período estudado as emissões pelo uso corresponderam a 12% do total. Por este mesmo motivo, entre 1998 e 2005 as emissões do setor ainda são pequenas: como os primeiros equipamentos

que utilizavam HFCs acabaram de ser produzidos e vendidos, poucos ainda foram descartados, sendo assim, suas principais emissões ainda estão para ocorrer. A partir de 2005 há um crescimento mais acentuado da quantidade de gás emitido, os equipamentos vendidos com HFC começam a ser sucateados. Tendo em vista que o crescimento das vendas de aparelhos de refrigeração é mais elevado entre 1999 e 2020, as emissões neste período apresentam maior crescimento. A partir de 2025 as emissões são suavizadas, dado que a partir deste ano, as taxas de crescimento das vendas são menores.

Na Figura 40 as emissões de HFC-134a na categoria de equipamentos de refrigeração doméstica entre 1999 e 2050 são apresentadas. Pode-se destacar o crescimento acentuado das emissões nesta categoria de equipamentos cujas emissões eram próximas de nula em 1999, alcançando mais de 1,3GgCO₂eq em ambos os cenários em 2050.

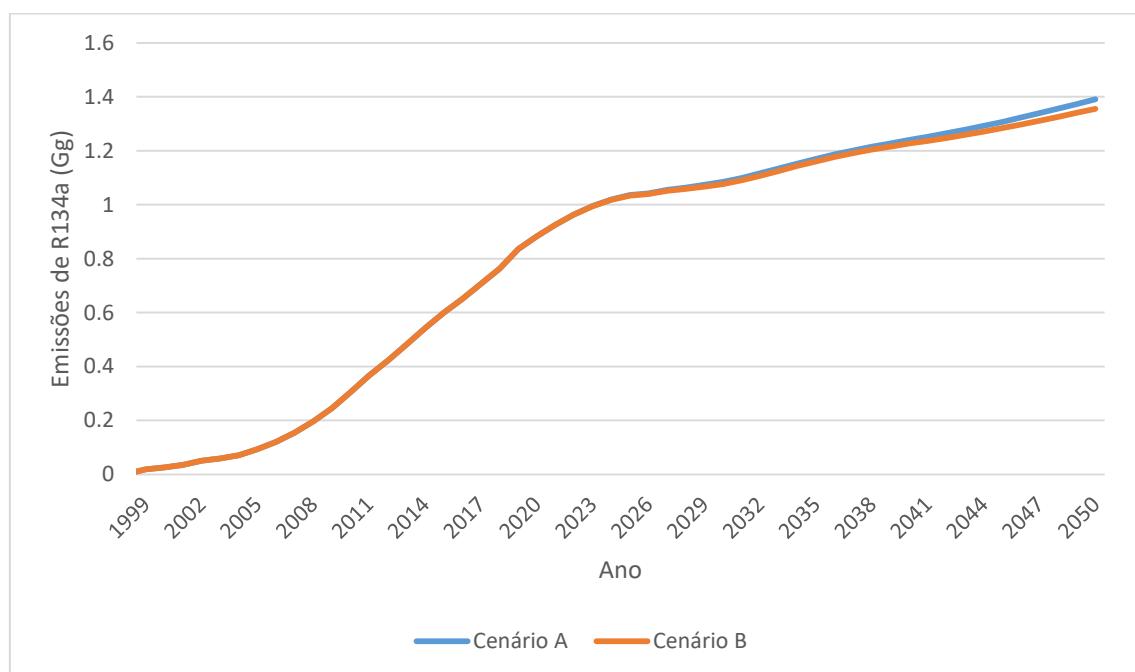


Figura 40. Emissões totais de refrigeração doméstica em ambos cenários de crescimento do PIB

Fonte: Elaboração própria

Mesmo com um crescimento menor do PIB, as emissões totais de gases fluorados nesta categoria não tiveram alterações significativas. No ano de 2050, as emissões dos equipamentos domésticos de refrigeração no Cenário A foram de 1,39Gg de HFC-134a *versus* 1,36Gg no cenário de menor crescimento do PIB, estes valores equivalem à, aproximadamente, 1,90 e 1,75GgCO₂eq, respectivamente. Como, em boa parte do período estudado, a quantidade destes aparelhos não apresentou diferenças

significativas, as emissões acompanharam este comportamento. Além disso, como a maior parte das emissões ocorre durante o sucateamento, há um *lag*, *i.e.*, uma demora para que o aumento das vendas de geladeiras e *freezers* resulte em um aumento das emissões.

A Figura 41 e Figura 42 apresentam a quantidade de gás fluorado causador de efeito estufa que poderia ser abatido: através do recolhimento no fim de vida do refrigerante, cujo custo de mitigação calculado pela Equação 4-5 e Equação 4-6 foi de 1,00M€/GgCO₂eq; pela a substituição do gás por isobutano, a um custo de abatimento de 7,78M€/GgCO₂eq, também calculado pelas equações supracitadas; ou pela implementação das duas medidas juntas.

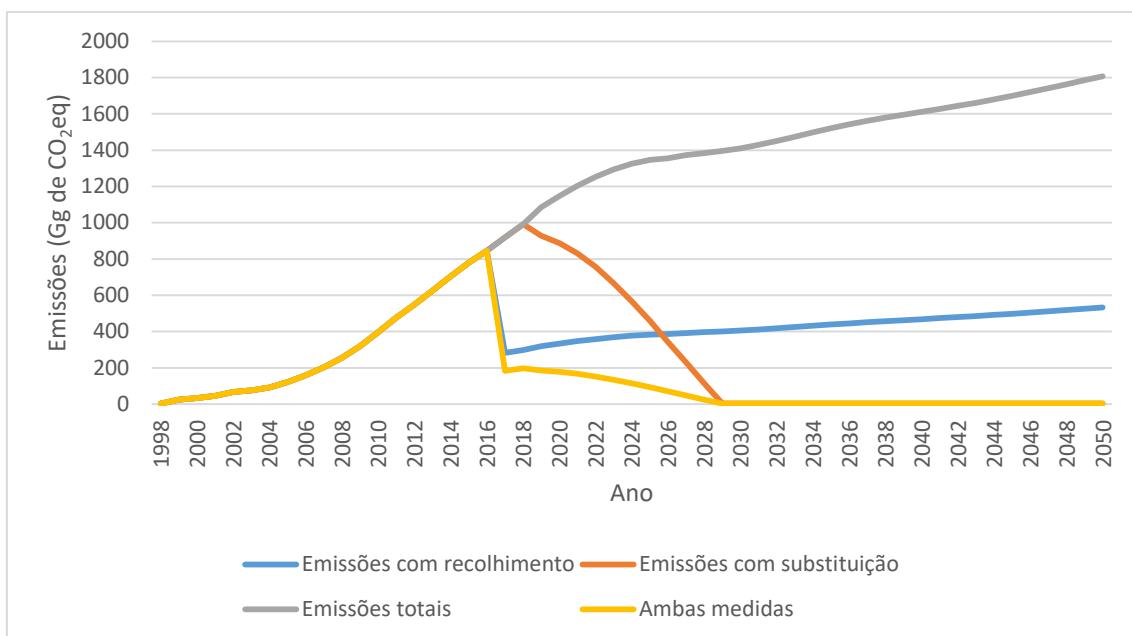


Figura 41. Emissões totais e abatidas na refrigeração doméstica pelo recolhimento, substituição do fluido e ambas medidas no Cenário A.

Fonte: Elaboração própria

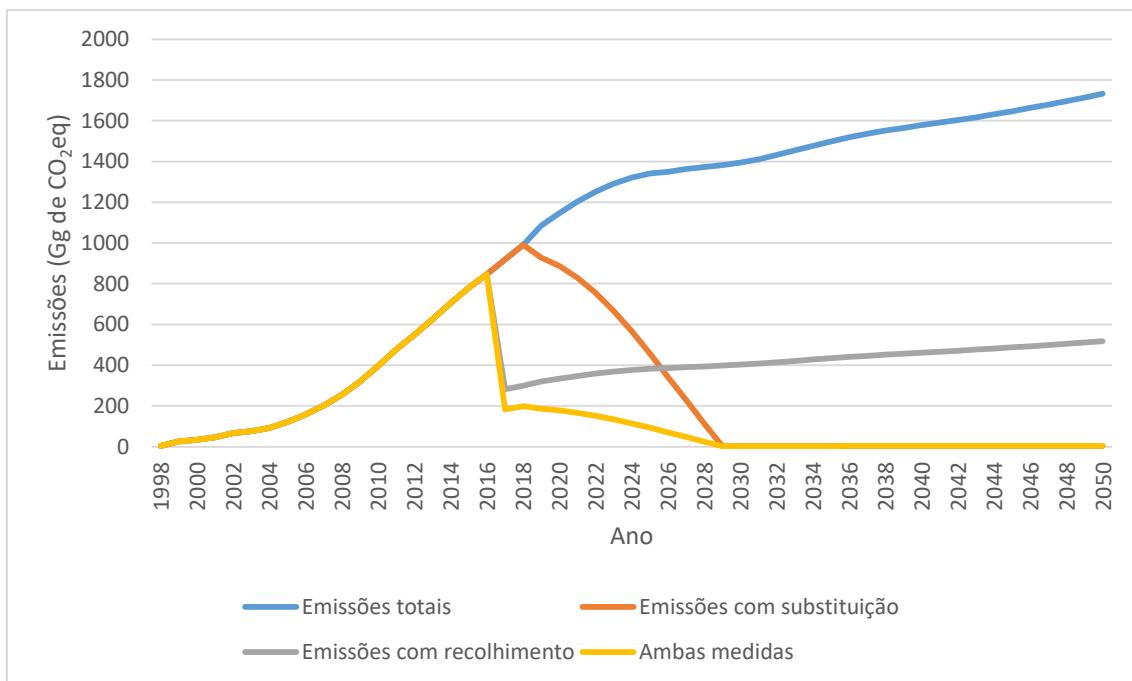


Figura 42. Emissões totais e abatidas na refrigeração doméstica pelo recolhimento, substituição do fluido e ambas medidas no Cenário B.

Fonte: Elaboração própria

A substituição do fluido refrigerante pelo isobutano reduz em praticamente 100% as emissões, devido ao seu baixo GWP₁₀₀ (valor inferior a um) quando comparado com o potencial do HFC-134a (GWP₁₀₀ de 1300). Conforme novos equipamentos penetram no mercado com o refrigerante de menor GWP, as emissões do setor reduzem gradualmente a partir de 2017, chegando a valores, em Gg de CO₂eq próximos a zero em 2030.

Para o recolhimento do fluido ao fim de vida do equipamento, é possível notar uma queda brusca das emissões totais em 2017. Isto acontece pois as principais emissões do setor ocorrem no seu sucateamento, uma vez que esta medida é implementada, os resultados são observados logo no seu primeiro ano. Entretanto, o potencial de redução de 80% desta medida não permite que as emissões sejam anuladas da mesma forma que com a substituição do fluido refrigerante.

Evidentemente que ao utilizar as duas opções de mitigação obteve-se a maior quantidade de gás de efeito estufa abatido. Todavia, a partir de 2030, como todos os equipamentos já utilizam o refrigerante substituto, não há ganhos significativos com o recolhimento.

5.2 Refrigeração comercial

A regressão linear do logarítmico das vendas *versus* o logarítmico do PIB do setor comercial gerou uma reta cujo coeficiente angular é igual a 1,5609, com um R^2 igual a 0,70. Como fora mencionado na metodologia deste trabalho, tal coeficiente representa a elasticidade das vendas dos equipamentos de refrigeração comercial. Sendo assim, se o PIB deste setor aumenta em uma unidade, as vendas aumentarão em 1,5609 unidades. A projeção do número de unidades vendidas para esta categoria de equipamentos entre 2015 e 2050 nos dois cenários de crescimento do PIB são apresentadas na Figura 43.

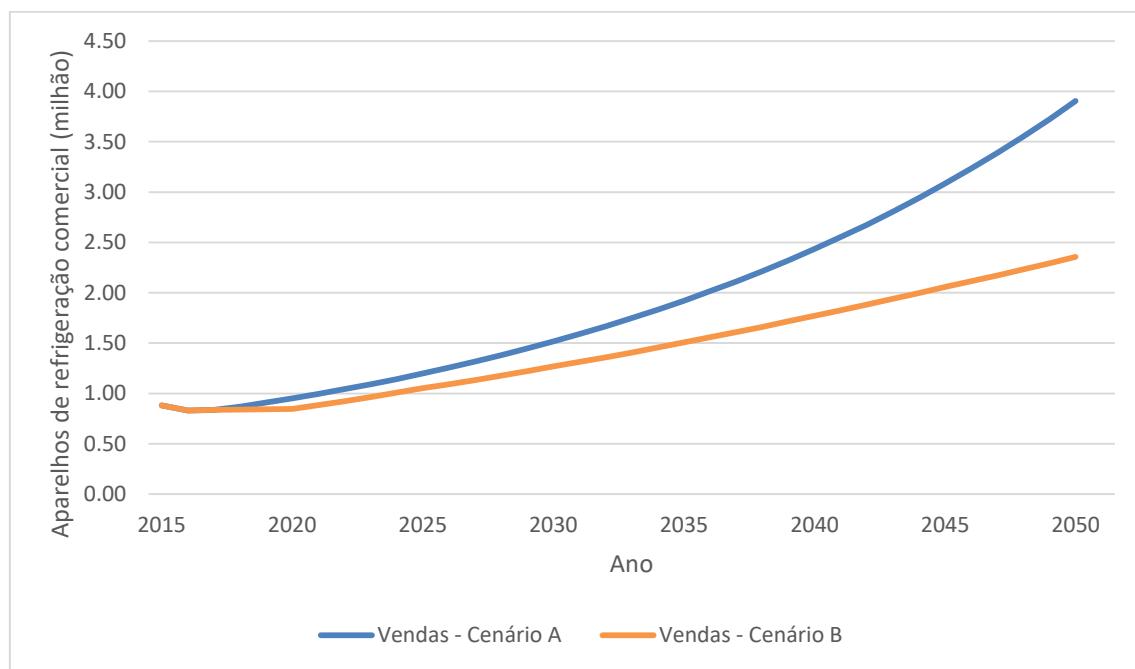


Figura 43 Vendas de equipamentos de refrigeração comercial com HFC entre 2014 e 2050

Fonte: Elaboração própria

Saindo de 0,83 milhão de aparelhos de refrigeração comercial vendidos em 2015, o Cenário A atinge 3,90 milhões de unidades em 2050, valor 65% maior que o do Cenário B no mesmo ano, equivalente a 2,36 milhões.

Utilizando as vendas anuais projetadas, a quantidade total destes equipamentos pode ser calculada sabendo que um determinado aparelho de refrigeração será sucateado após 15 anos, conforme estabelecido na seção da metodologia deste setor. A Figura 44 apresenta a quantidade total de refrigeradores comerciais que utilizam HFC (HFC-134a e R-404a) até 2050.

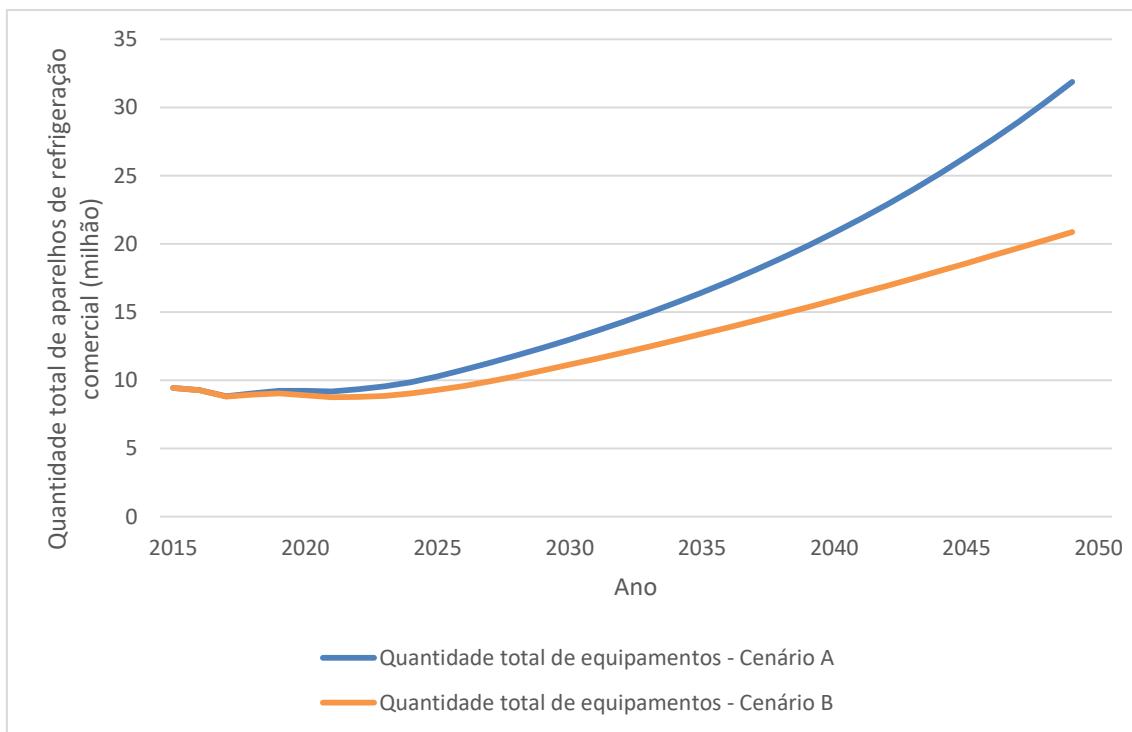


Figura 44. Quantidade total de equipamentos de refrigeração comercial com HFC
Fonte: Elaboração própria

Em 2015, a quantidade total de aparelhos de refrigeração comercial com HFCs era de aproximadamente 9,43 milhões de unidades, com o crescimento do PIB, este total chega, em 2050, entre 20,87 milhões e 31,86 milhões de aparelhos no último ano estudado, nos Cenários A e B respectivamente.

Com base na quantidade das vendas, na quantidade total de equipamentos de refrigeração comercial foi estimada a quantidade total de refrigerante que será emitido ao longo de todo período estudado, sendo as fontes segregadas em emissões provenientes do uso e emissões provenientes do sucateamento destes aparelhos. A Figura 45 e Figura 46 apresentam estas informações para o período entre 1998 e 2050.

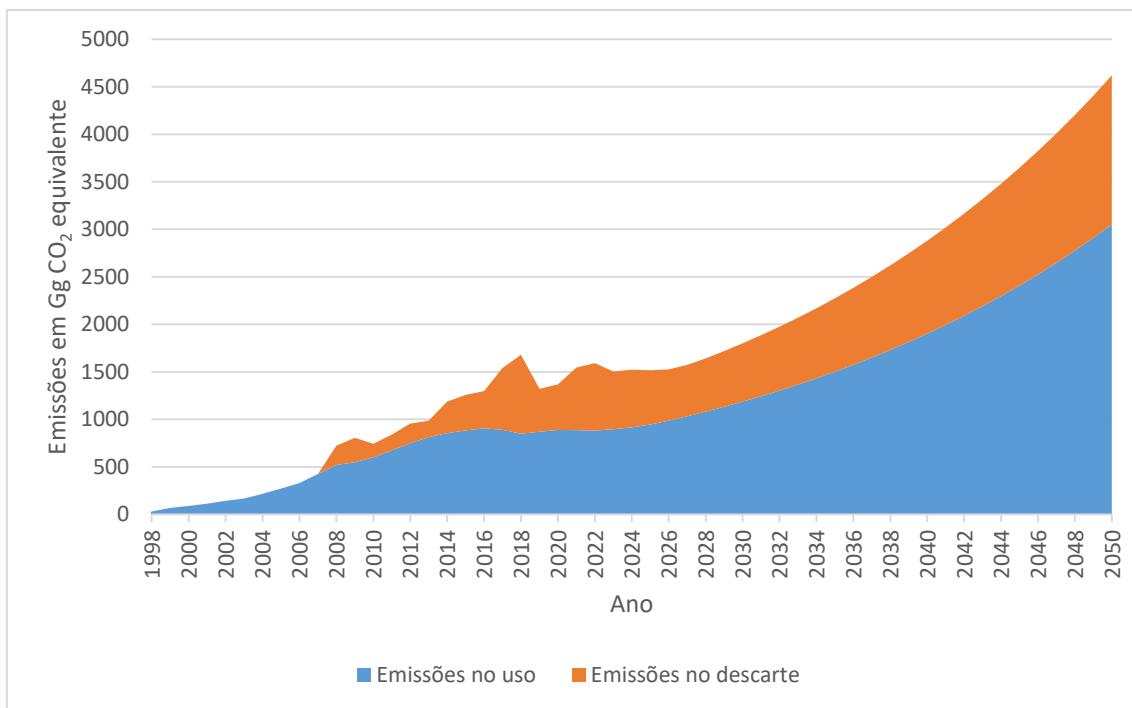


Figura 45. Emissões totais de gases fluorados no setor de refrigeração comercial entre 1998 e 2050 no Cenário A

Fonte: Elaboração própria

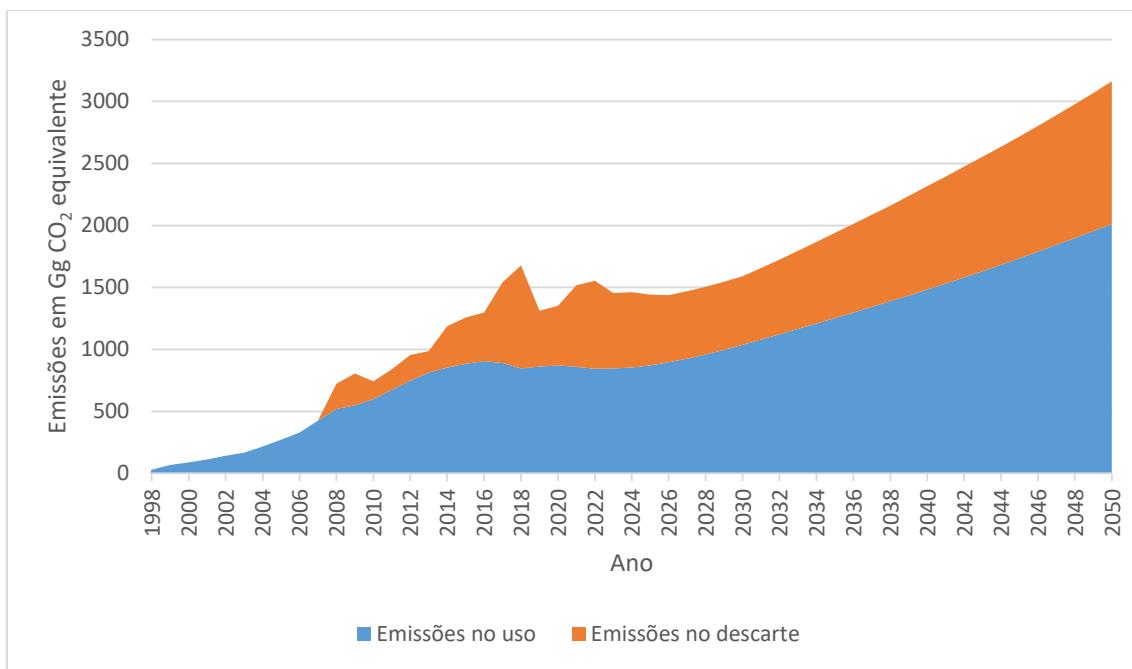


Figura 46. Emissões totais de gases fluorados no setor de refrigeração comercial entre 1998 e 2050 no Cenário B

Fonte: Elaboração própria

Note que, diferentemente do setor de refrigeração doméstica, as emissões para os equipamentos comerciais são predominantes no uso, devido suas maiores taxas de emissão. Em ambos cenários, estas fugas representam 73%, em média, das emissões

totais do setor entre 1998 e 2050, sendo, neste último ano, equivalentes a 65% de todas as emissões.

A Figura 47 apresenta as emissões dos equipamentos de refrigeração comercial em ambos cenários, para que se possa ter uma visão mais comparativa da influência do PIB nas emissões deste setor.

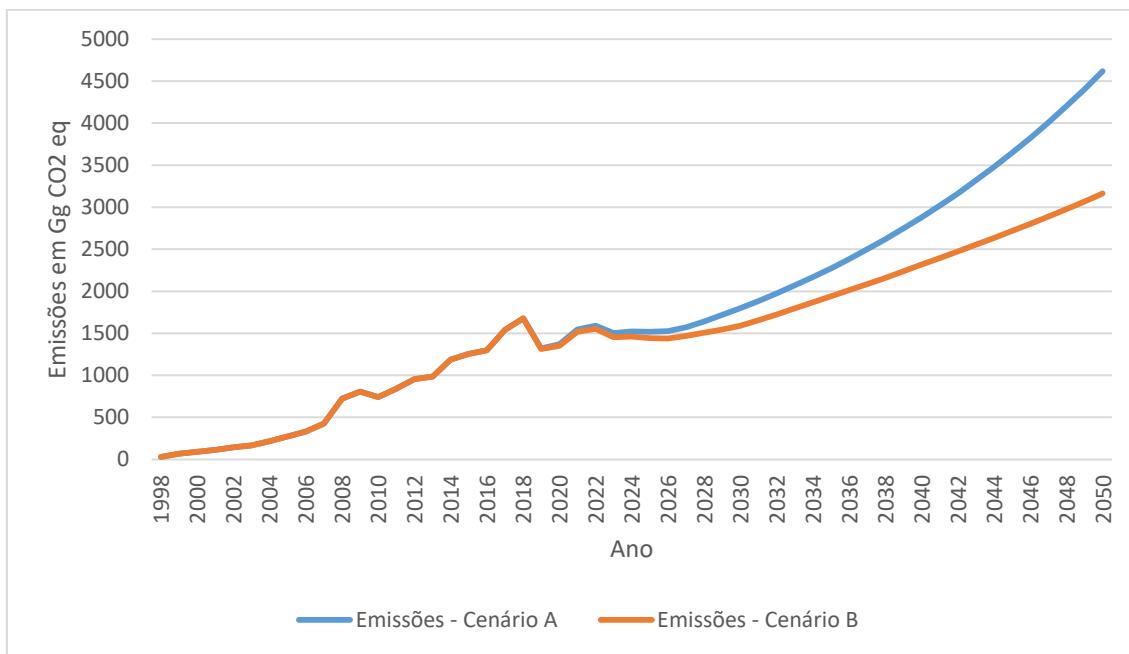


Figura 47. Emissões dos equipamentos de refrigeração comercial em ambos cenários no Brasil entre 1998 e 2050

Fonte: elaboração própria

Como o PIB é um fator que influencia nas vendas de aparelhos de refrigeração comercial, consequentemente na quantidade total de equipamentos, o Cenário A cujo crescimento do PIB é maior ao longo do período estudado, apresentou maiores emissões. No ano de 2050, para um PIB 27% maior que do Cenário B, as fugas de gases fluorados foram 46% maiores em termos de CO₂eq, em termos absolutos, as emissões do Cenário A no último ano totalizam 4.418 Gg de CO₂eq contra 3.162 Gg de CO₂eq no Cenário B.

Em relação à medida de controle que visa substituir o fluido refrigerante, optou-se por utilizar o HFC-152²⁰, que apresentou um custo de abatimento de 5,61 M€/GgCO₂eq, calculado pela Equação 4-5 e pela Equação 4-6. O controle de vazamento e recolhimento ao fim de vida, também calculado por essas equações citadas, resultou em um custo de abatimento de 24,96 M€/GgCO₂eq. A Figura 48 e a Figura 49 apresentam as emissões nestes dois cenários junto com as emissões quando implementadas as devidas medidas de controle mencionadas na seção metodológica deste trabalho.

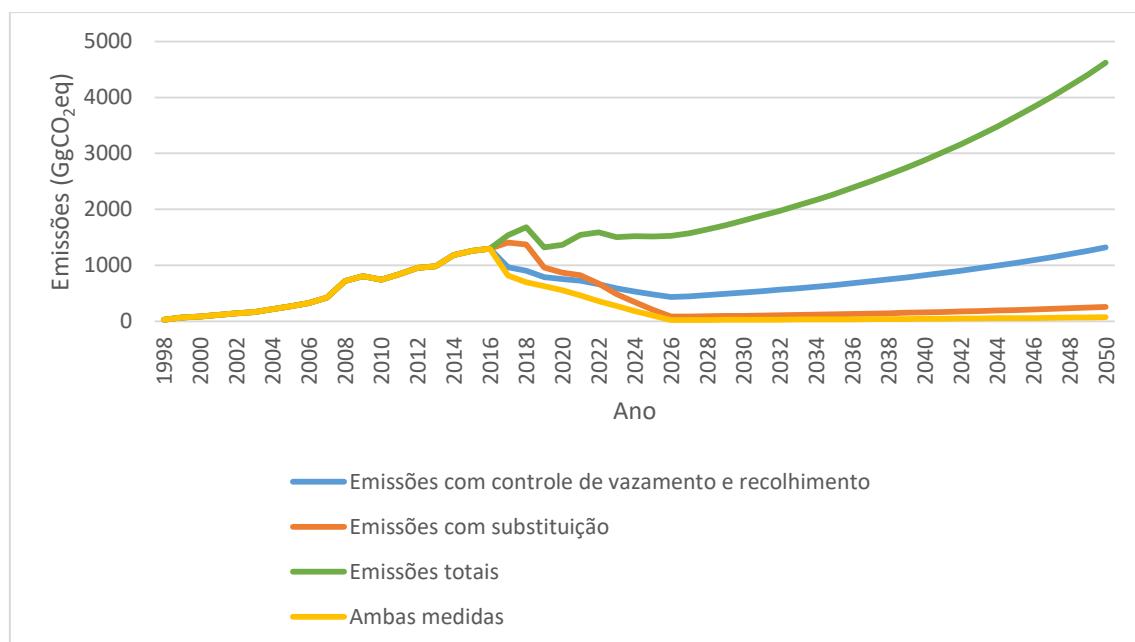


Figura 48. Emissões totais com medidas de controle no setor de refrigeração comercial entre 1990 e 2050 no Cenário A

Fonte: Elaboração própria

²⁰ Os custos marginais de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o HFC-152.

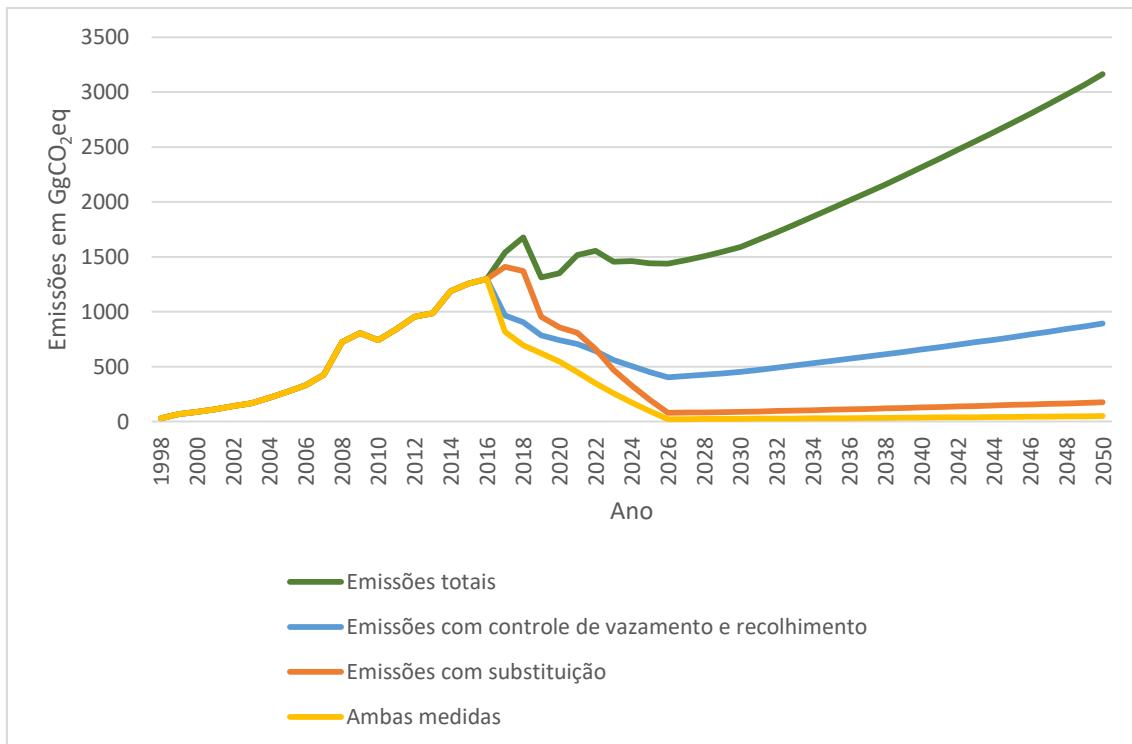


Figura 49. Emissões totais com medidas de controle no setor de refrigeração comercial entre 1990 e 2050 no Cenário B

Fonte: Elaboração própria

Através da implementação do controle de vazamento e do recolhimento de gases fluorados será possível reduzir as emissões em 37% logo no primeiro ano de sua implementação e em 2025 atinge 70%, percentual máximo de redução das emissões desta medida, desta maneira conforme a quantidade de equipamentos neste setor cresce, as emissões o fazem também.

Já a substituição por HFC-152, cujo potencial de mitigação de emissões é de 93,81%, em 10 anos reduz quase todas as emissões de aparelhos de refrigeração comercial, atingindo em 2026 a quantia de 85 GgCO₂eq e 80 GgCO₂eq no Cenário A e B respectivamente, estes valores são inferiores a quantidade de gases fluorados emitidos no ano 2000. Em 2050, esta medida foi capaz de abater 4.362 Gg de CO₂, eq no Cenário A e 2.986 no Cenário B, aproximadamente 94% das emissões sem medidas de controle.

Com as duas medidas de controle juntas, logo no primeiro ano há uma redução de 48% das emissões totais do setor e a partir de 2006, 98% de todas as emissões são abatidas por essas ações.

5.3 Ar condicionado residencial

A regressão linear da função linearizada da difusão de ar condicionados, Equação 4-15 nas residências resultou nos coeficientes apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 Coeficientes da função de difusão de ar condicionados residenciais.

Equipamento	α_{ACR}	γ_{ACR}	β_{ACR}	R^2
Ar condicionado	98%	170,50	-1,33E-04	0,8292

Fonte: Elaboração própria

Utilizando estes coeficientes na Equação 4-14, é possível estimar a posse média destes equipamentos de condicionamento de ar em todo período desejado. A Figura 50 apresenta os valores da posse média entre 2015 e 2050.

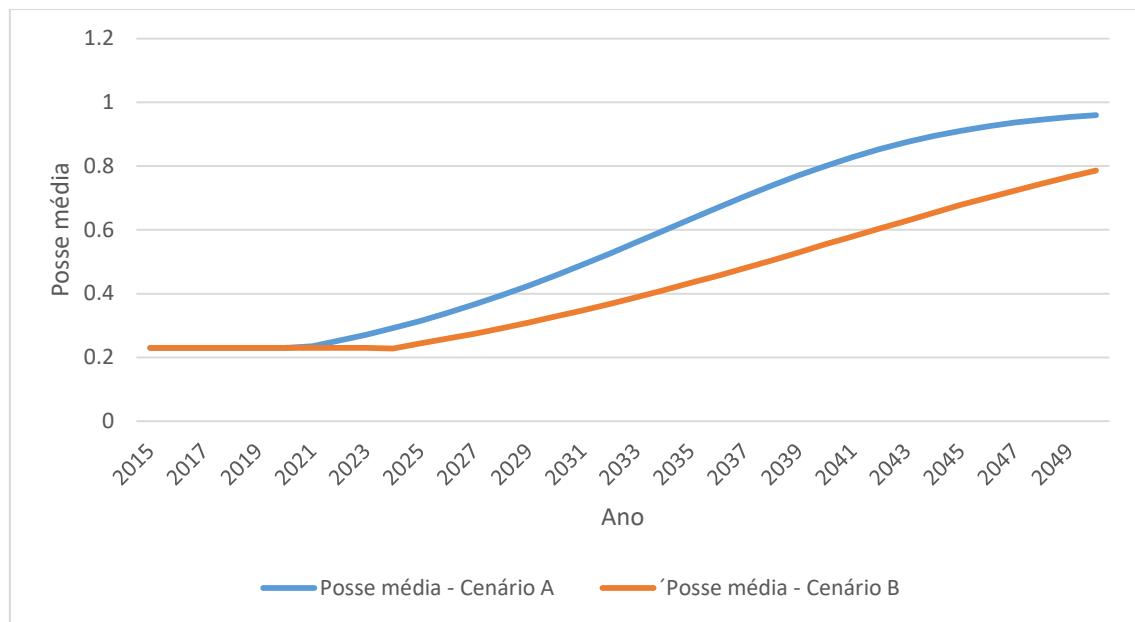


Figura 50. Posse média de ar condicionados residenciais nos dois cenários de crescimento do PIB

Fonte: Elaboração própria

No cenário de maior crescimento do PIB, a difusão de ar condicionados nas residências brasileiras alcançou o valor de 96%, aproximadamente, e no Cenário B, onde o PIB em 2050 é 27% menor, a posse média foi igual a 79%. Comparando com o valor apresentado em EPE (2016), cuja difusão em 2050 é de 1,37..

Sabendo a posse média de ar condicionados até 2050 foi calculada a quantidade total de aparelhos entre 2015 e 2050, como pode ser visto na Figura 51.

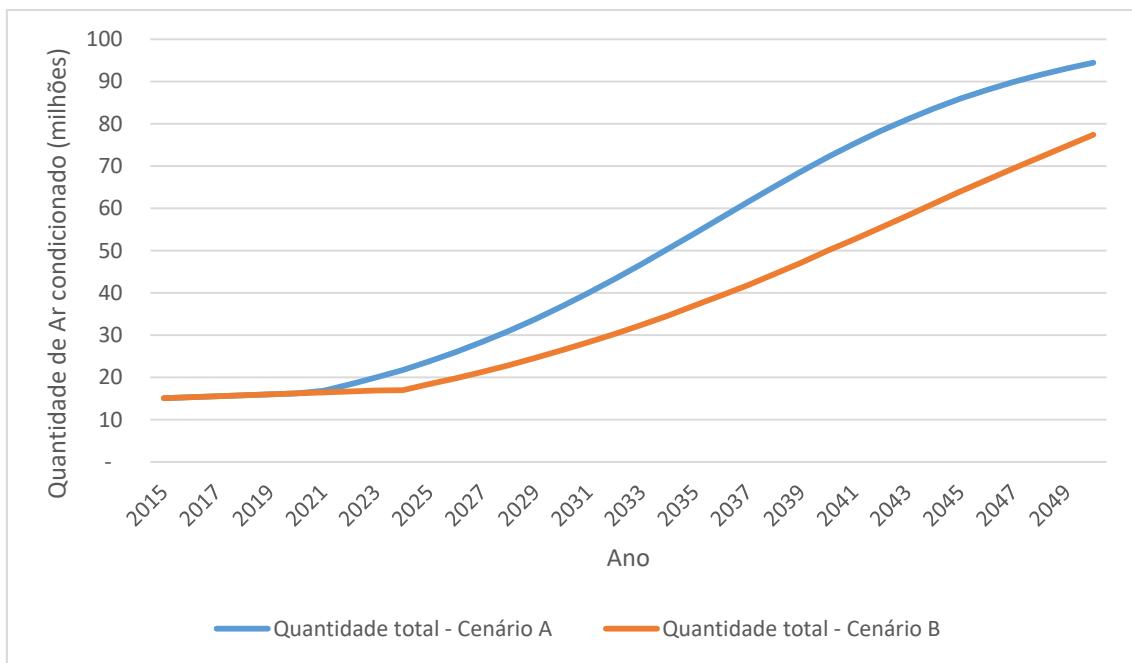


Figura 51. Quantidade total de aparelhos de ar condicionado domiciliar entre 2015 e 2050

Fonte: Elaboração própria

A quantidade total de ar condicionados domiciliares em 2050 no Cenário A é de 94 milhões de unidades contra 77 milhões do Cenário B, aproximadamente 22% maior que o resultado do cenário de menor crescimento do PIB.

As emissões totais deste setor em cada cenário são apresentadas nas Figura 52 e Figura 53, discriminando-se as fugas se provenientes do uso ou do descarte.

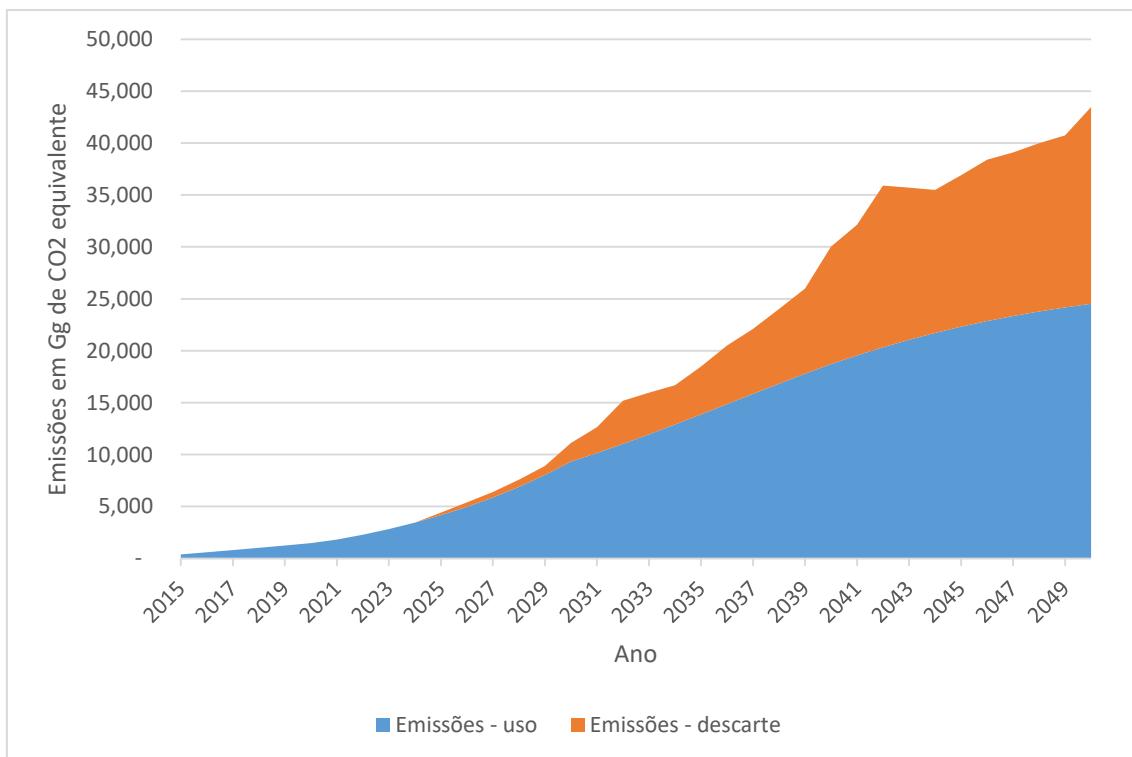


Figura 52. Emissões de ar condicionados domiciliares - Cenário A

Fonte: Elaboração própria

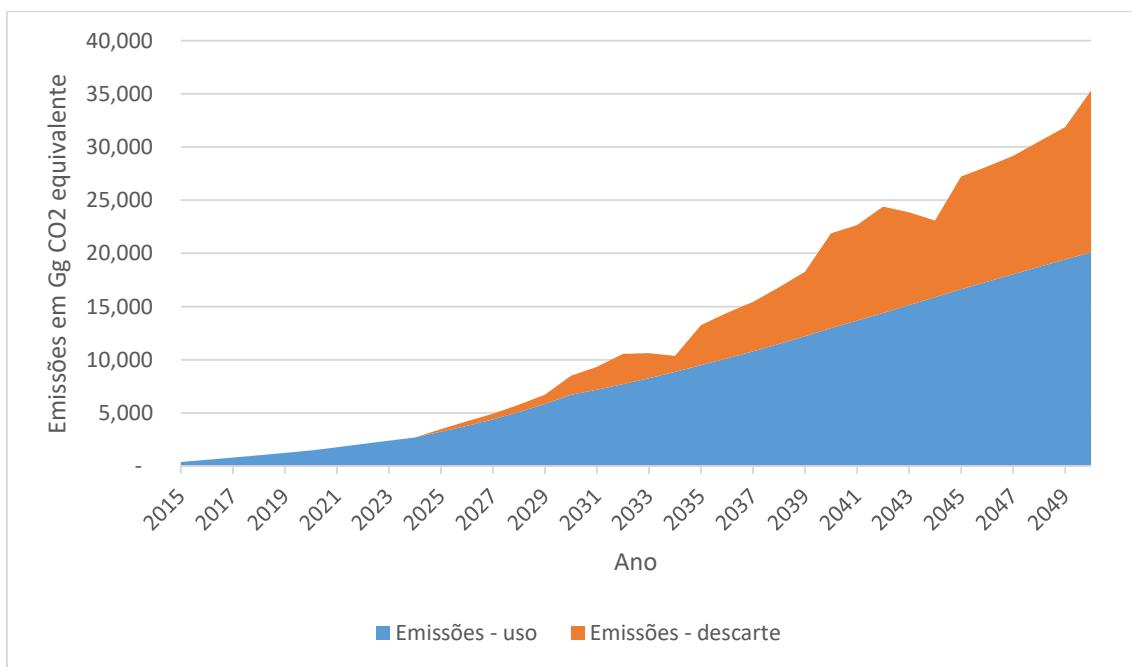


Figura 53. Emissões de ar condicionados domiciliares - Cenário B

Fonte: Elaboração própria

Em ambos cenários o crescimento das emissões torna-se mais acentuada a partir de 2025, quando os primeiros equipamentos de ar condicionado que utilizam fluido refrigerante fluorado passam a ser sucateados. No ano de 2050, a proporção das

emissões provenientes do descarte de equipamentos alcança a parcela de 44% do total das fugas nos dois cenários.

Nota-se que nas emissões por sucateamento há descontinuidades nas projeções até 2050. Isto ocorre pois as fugas por sucateamento estão correlacionados com os valores da produção de ar condicionado, que até 2015 foram retiradas da literatura. Ou seja, as emissões ao fim de vida deste aparelho em 2025 é uma função da quantidade de equipamentos produzidos em 2015, dado que possuem tempo de vida de 10 anos. Desta maneira, as emissões por sucateamento posteriores irão reproduzir um comportamento discreto.

A fim de comparar as emissões dos dois cenários projetados, é apresentado a Figura 54 com as respectivas emissões totais.

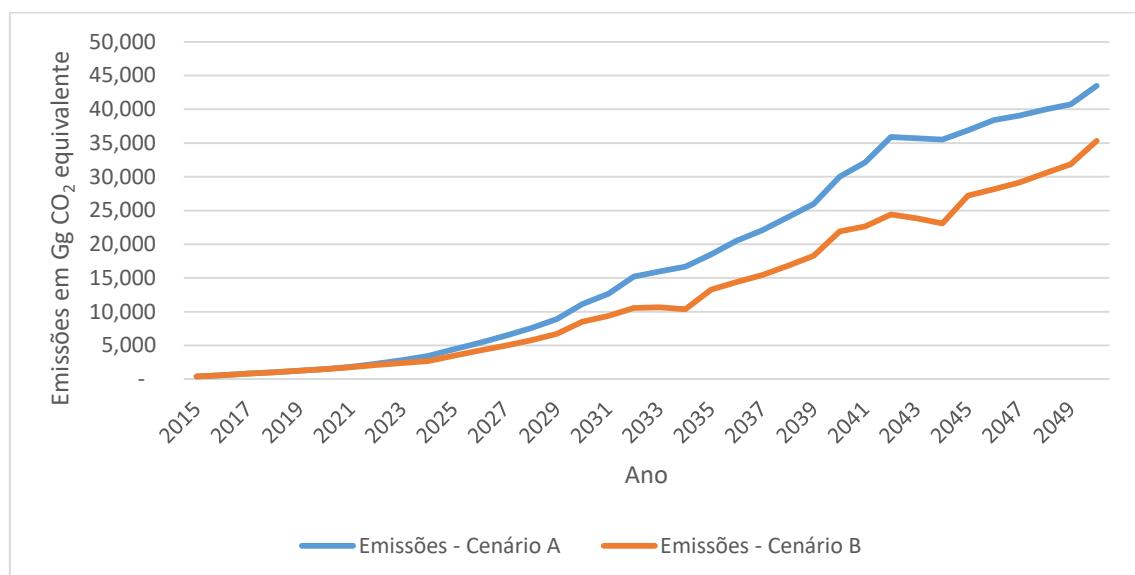


Figura 54. Emissões totais de ar condicionados residenciais nos dois cenários de crescimento do PIB

Fonte: Elaboração própria

A partir de 2025, quando as posses médias de ares-condicionados nas residências brasileiras de cada cenário passam a se destacar, as emissões também o fazem. No ano de 2050, o crescimento do PIB mais elevado resultou aproximadamente 43 mil Gg de CO₂ eq, 23% maior do que os 35 mil Gg de CO₂ eq do Cenário B.

Novamente, observa-se uma descontinuidade nas emissões totais de ambos cenários. Esta é causada pelas emissões ao fim de vida dos equipamentos, que por sua vez são uma função de valores discretos até 2015, que são a produção de ares-condicionados.

A Figura 55 e Figura 56 apresentam as emissões totais de gases fluorados nos dois cenários de crescimento de PIB, como também as fugas quando aplicadas as devidas medidas de mitigação. Neste setor, será utilizado, como refrigerante substituto, o HFC-152²¹ por possuir um custo de abatimento de -4,21 M€/GgCO₂eq, calculado pela Equação 4-5 e Equação 4-6. Em relação ao controle de vazamento e recolhimento ao fim de vida, o custo de abatimento foi de 48,84 M€/GgCO₂eq.

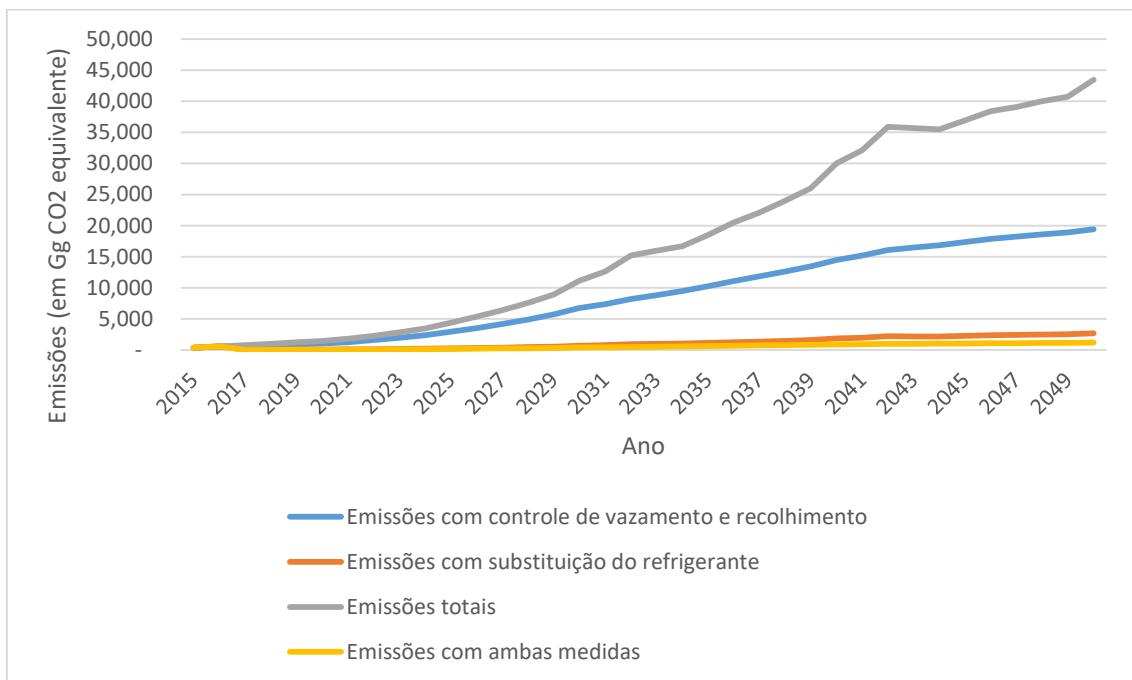


Figura 55 Emissões totais e emissões com medidas de controle- Ar Condicionado Residencial - Cenário A

Fonte: Elaboração própria

²¹ Os custos marginais de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o HFC-152.

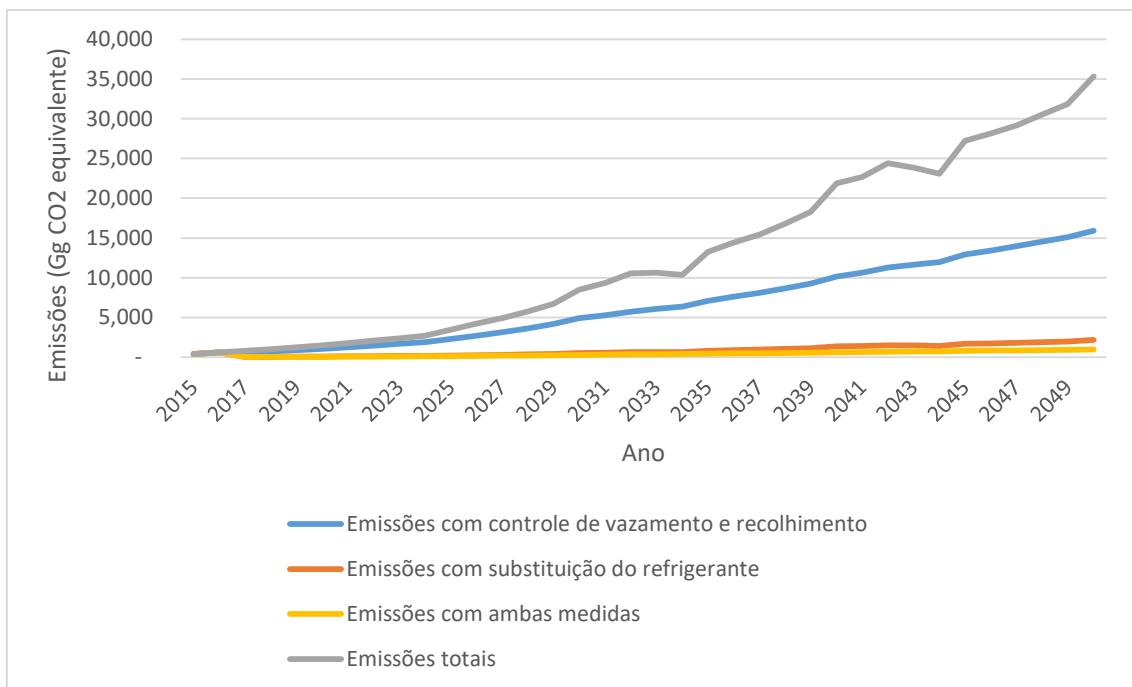


Figura 56. Emissões totais e emissões com medidas de controle- Ar condicionado residencial - Cenário B

Fonte: Elaboração própria

A implementação do controle de vazamento e recolhimento do gás fluorado nos equipamentos de ar condicionado consegue abater, nos dois cenários, 47%, em média das emissões totais, com o máximo de 45% de redução das fugas em 2050.

Já a substituição do fluido R-410a por R152 resulta na diminuição de 94% das emissões totais em todo o período estudado. Como os aparelhos de ar condicionado começaram a utilizar refrigerante fluorado apenas em 2015, a substituição em 2017 resultaria em emissões extremamente baixas quando comparadas com as fugas que poderiam ocorrer em todo o período estudado.

O controle de vazamento e recolhimento junto com a substituição apresenta as menores emissões entre 2015 e 2050, entretanto implementar o controle de vazamento e recolhimento incrementa a redução de emissões em apenas 2% do total quando comparadas com apenas a substituição do fluido refrigerante.

5.4 Ar condicionado comercial

Utilizando a Equação 4-16 que correlaciona a área, em m²/empregado, com a renda per capita, foi projetada esta razão em todos os anos do período desejado. A área total do setor comercial foi calculada de acordo com a seção metodológica deste

trabalho utilizando as informações da Tabela 30. As Figura 57 e Figura 58 apresentam os resultados da área por empregado como também a área total deste setor.

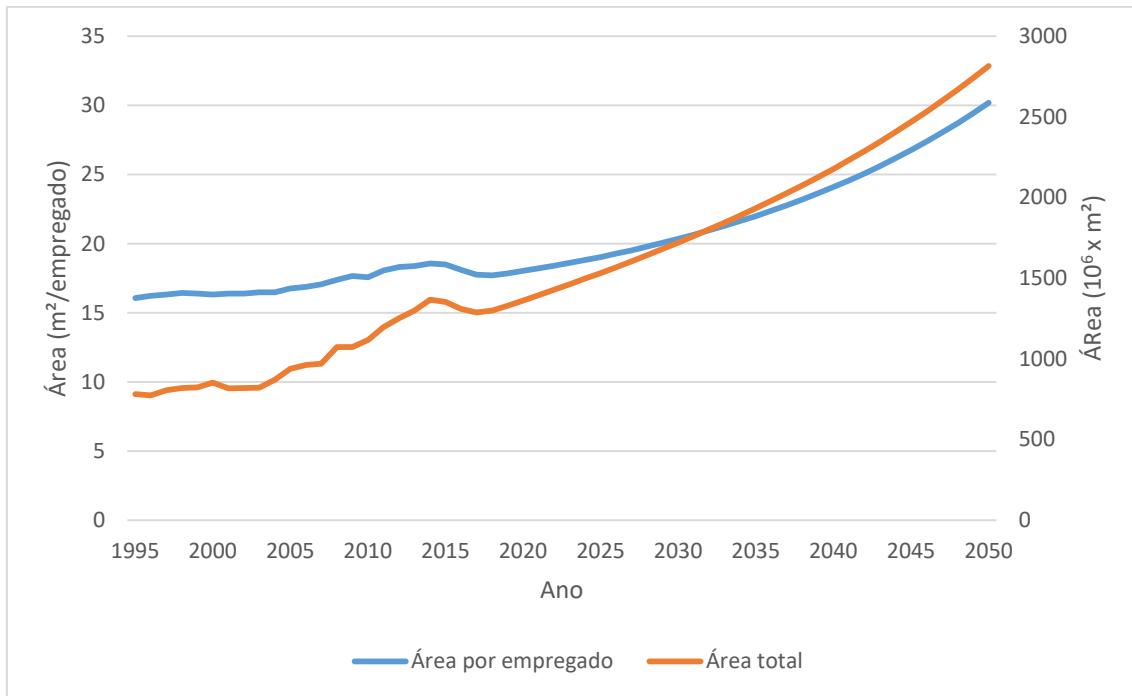


Figura 57. Área por empregado e área total do setor comercial - Cenário A

Fonte: Elaboração própria

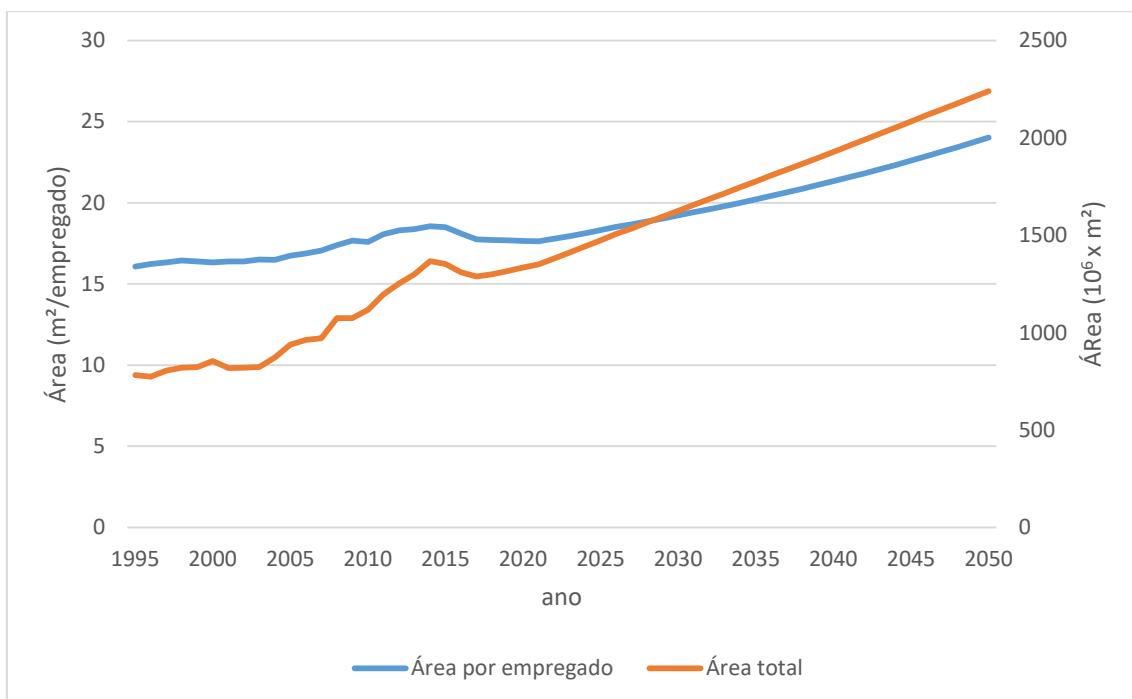


Figura 58. Área por empregado e área total do setor comercial - Cenário B

Fonte: elaboração própria

A área por empregado em ambos cenários em 1995 é igual a 16 m², chegando em 2050 ao valor de 30 m²/empregado e 24 m²/empregado nos Cenários A e B

respectivamente. A fim de comparação, estes dois últimos valores são inferiores a área por empregado nos Estados Unidos, China, Inglaterra e outros países europeus em 2008 (MCNEIL ET AL. 2008).

Tais razões resultam em uma área comercial total de $2,8 \times 10^9 \text{ m}^2$ e $2,2 \times 10^9 \text{ m}^2$ em 2050 nos Cenários A e B, respectivamente. Utilizando esta área e a proporção de carga/m² foi estimada a quantidade total da carga de R-404a anualmente nos equipamentos de ar condicionado comercial em todo período estudado. Este resultado é apresentado na Figura 59.

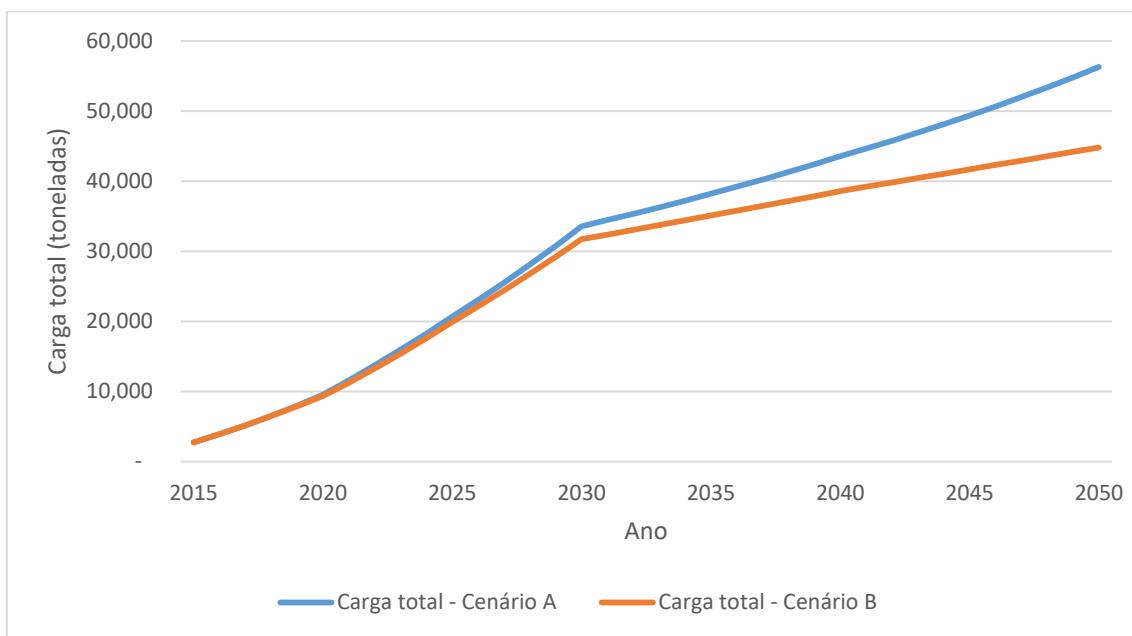


Figura 59. Carga total em equipamentos de ar condicionado comercial entre 2015 e 2050.
Fonte: Elaboração própria

Em 2015 ocorre a entrada dos primeiros equipamentos de ar condicionado que utilizam refrigerantes fluorados causadores de efeito estufa. Até 2030 ocorre a penetração gradativa destes fluidos, resultando em um crescimento da carga total mais acelerada quando comparado com o período após 2030. A quantidade total de fluido refrigerante no Cenário A em 2050 é de 56 mil toneladas, 27 % maior que o valor encontrado para o cenário de menor crescimento da renda.

Com a carga total de refrigerante em cada ano foi calculada a quantidade de gás fluorado emitido até 2050, apresentada na Figura 60 e Figura 61.

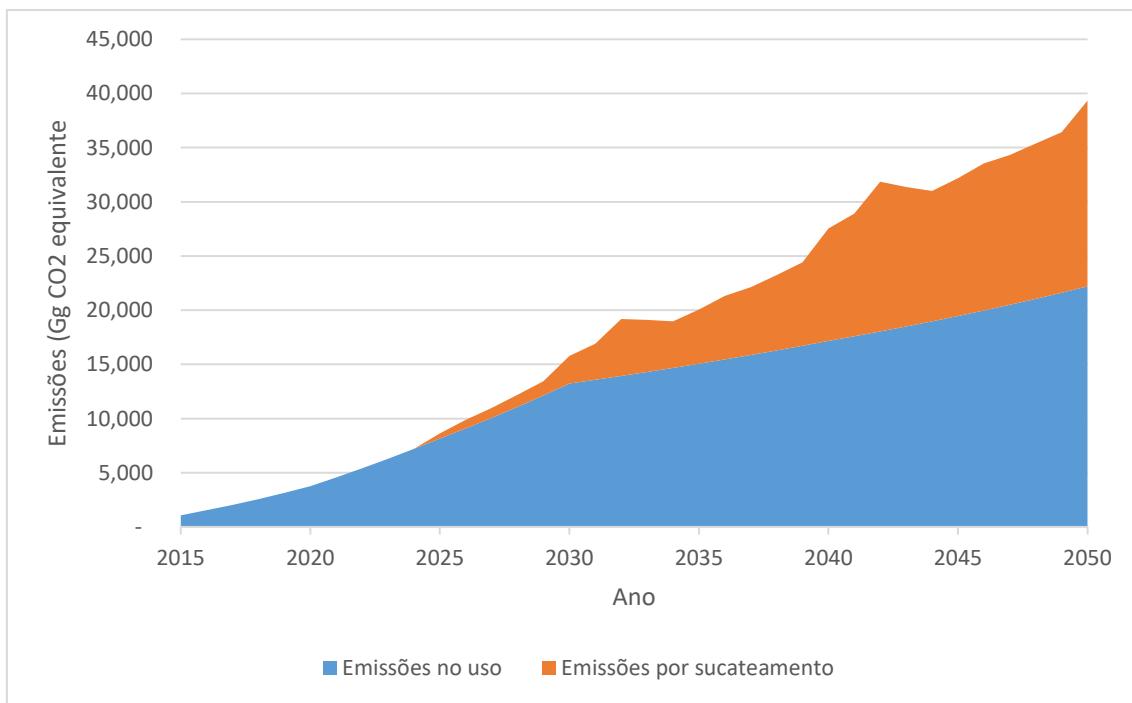


Figura 60. Emissões de aparelhos de ar condicionado comercial - Cenário A

Fonte: Elaboração própria

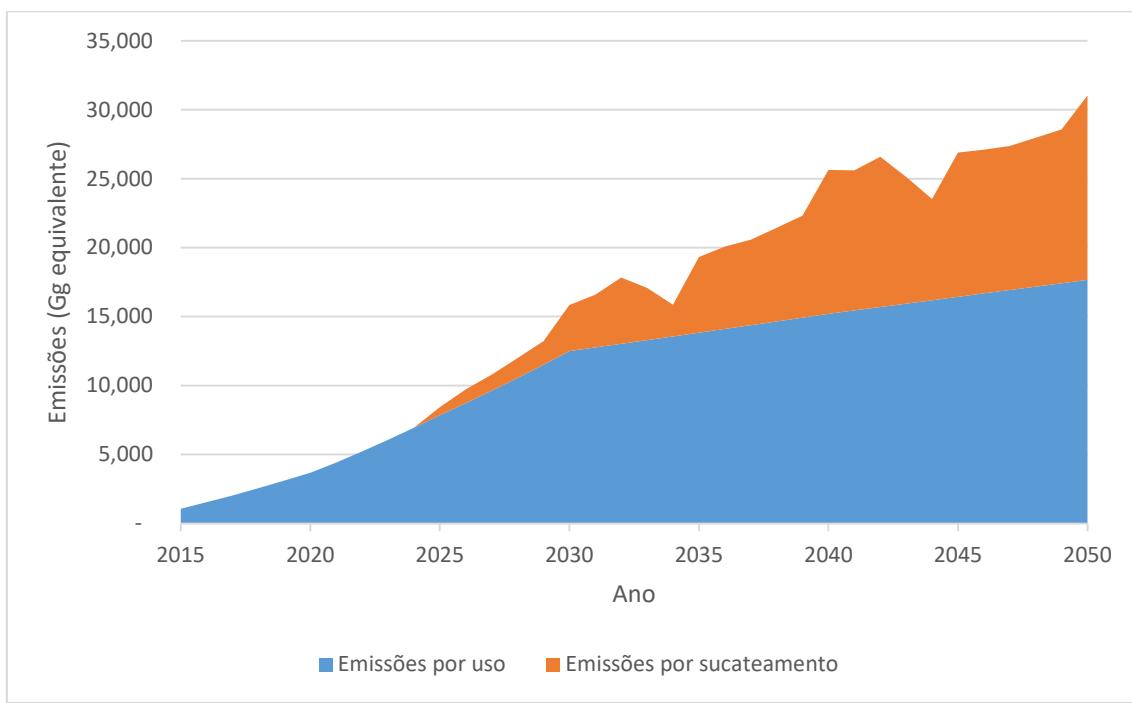


Figura 61. Emissões de aparelhos de ar condicionado comercial - Cenário B

Fonte: Elaboração própria

Nos dois cenários, dado o tempo de vida de 10 anos, as emissões por sucateamento só passam a acontecer a partir de 2025 e em 2050 correspondem a uma parcela de 44% do total das emissões do setor. Neste último ano, as emissões do Cenário A correspondem a 39GgCO₂ eq contra 31GgCO₂eq do cenário de menor crescimento do PIB brasileiro.

As descontinuidades nas emissões por sucateamento são causadas pois estas fugas neste segmento foram consideradas proporcionais à dos equipamentos residenciais. Como estes últimos apresentaram descontinuidades nas fugas ao fim de vida, tal comportamento foi reproduzido nos equipamentos comerciais.

A Figura 62 e Figura 63 apresentam as emissões referentes aos equipamentos de ar condicionado comercial: as fugas totais, as emissões quando implementadas medidas de controle como o controle de vazamento com recolhimento do refrigerante, a substituição do fluido e quando ambas medidas são implementadas em cada um dos cenários. O refrigerante escolhido como substituto será um hidrocarboneto alternativo²² devido ao seu custo de abatimento de 3,79 M€/GgCO₂eq, calculado pela Equação 4-5 e Equação 4-6. Já o custo do recolhimento ao fim de vida e controle de vazamento foi de 89,84 M€/GgCO₂eq.

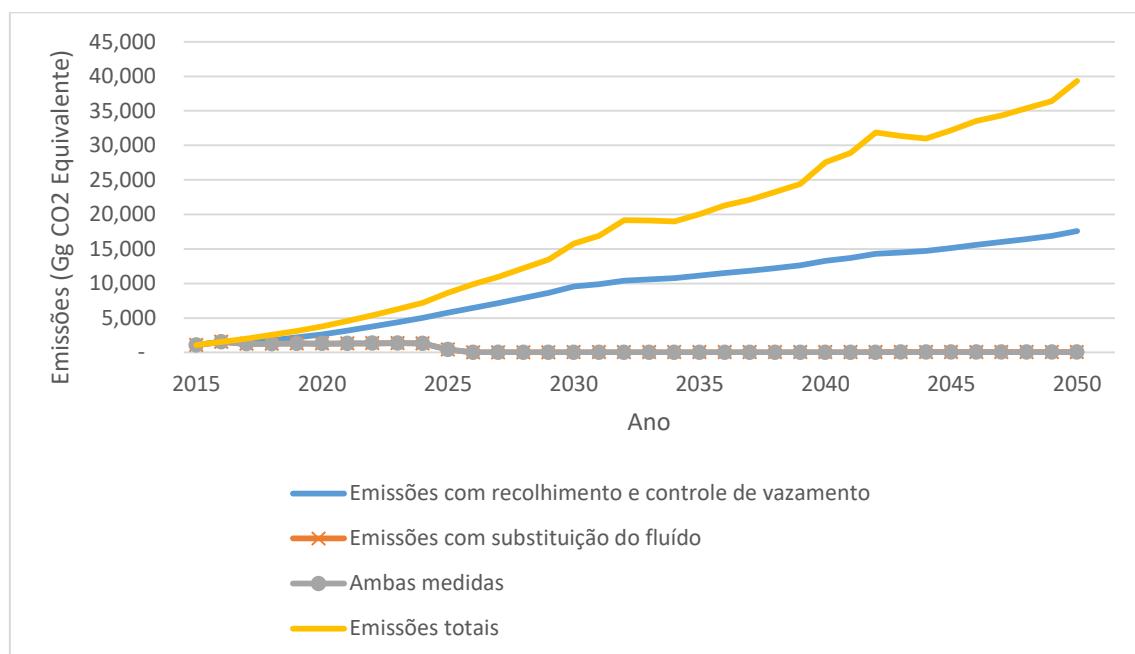


Figura 62. Emissões com medida de controle de aparelhos de ar condicionado comercial no Brasil - Cenário A
Fonte: Elaboração própria

²² Os custos marginais de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o hidrocarboneto alternativo.

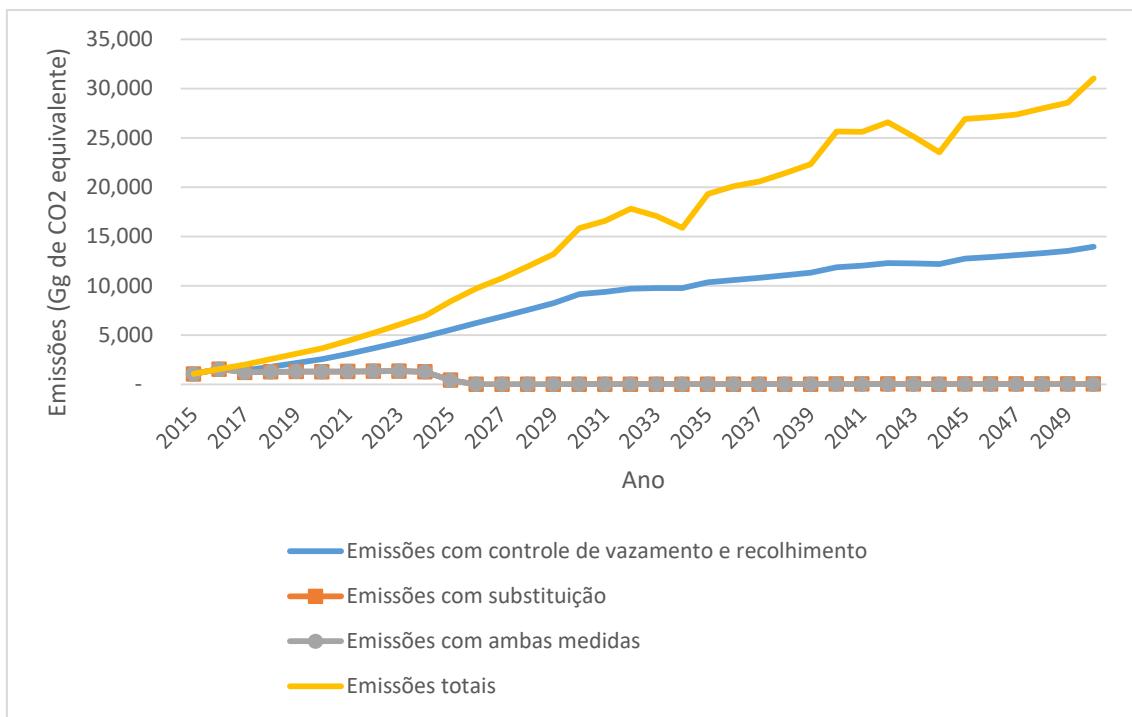


Figura 63. Emissões com medidas de controle de aparelhos de ar condicionado comercial no Brasil - Cenário B

Fonte: Elaboração própria

A implementação do controle de vazamento e recolhimento do refrigerante fluorado reduz, em média, 43% das emissões totais em ambos os cenários. Mitigações mais relevantes são encontradas quando o fluido é substituído por um hidrocarboneto alternativo: cerca de 92% das emissões totais são eliminadas e em 2050, as emissões com esta medida são próximas a zero. A utilização do controle de vazamento e o recolhimento do fluido junto com a sua substituição não apresenta nenhum ganho em termos de redução de emissões.

5.5 Ar condicionado Veicular

A regressão linear da função linearizada do licenciamento de veículos em relação a renda forneceu a elasticidade renda da demanda, como fora explicado na metodologia deste trabalho. A Tabela 39 apresenta a elasticidade de cada um dos veículos estudados: automóveis, comerciais leves, ônibus e caminhões, como também o R^2 de suas regressões.

Tabela 39. Elasticidade renda da demanda e o R² de suas regressões lineares.

Veículo	Elasticidade renda da demanda	R ²
Automóveis	1,34	0,9317
Comerciais leves	1,23	0,9426
Ônibus	0,69	0,6170
Caminhões	1,15	0,8822

Fonte: Elaboração própria

Com base nas elasticidades e no PIB brasileiro, a quantidade de veículos licenciados anualmente foi calculada até 2050, da maneira que para variação de 1 unidade do PIB a quantidade de novos veículos licenciados será 1 vezes a sua elasticidade.

A Figura 64 apresenta a quantidade de automóveis licenciados anualmente de 2015 até 2050.

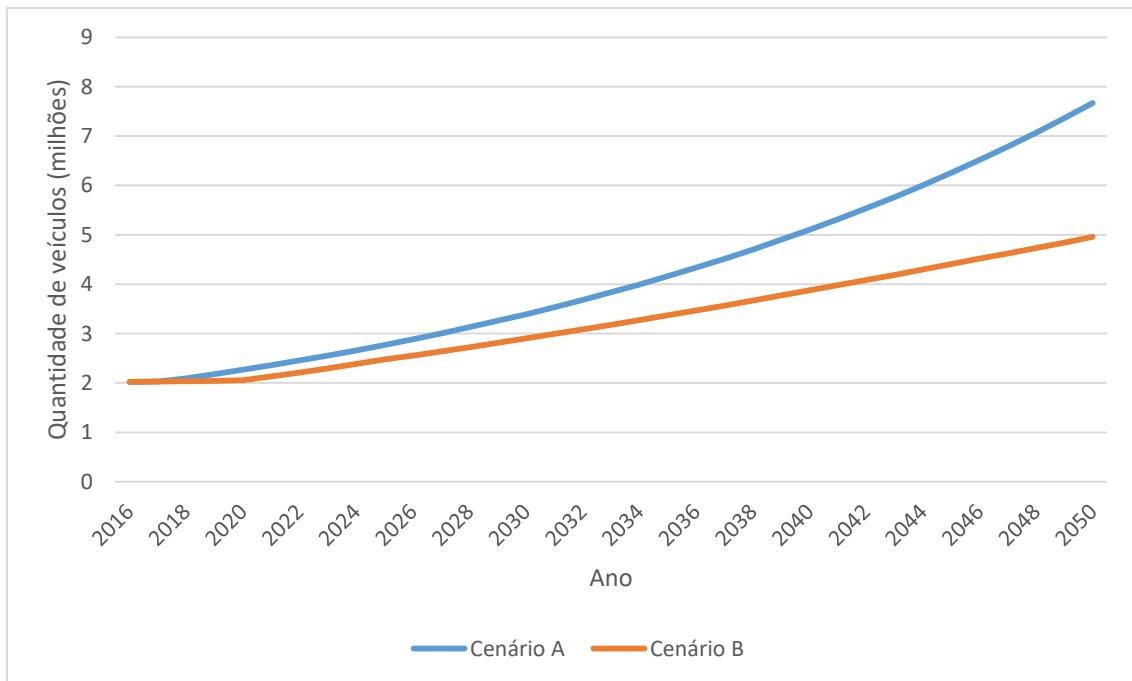


Figura 64. Quantidade de automóveis com ar condicionado licenciados entre 2016 e 2050.

Fonte: Elaboração própria

O cenário de maior crescimento do PIB resultou em 7,7 milhões de automóveis licenciados em 2050 contra 4,9 milhões no Cenário B. Utilizando estes valores anuais e a curva de sucateamento, a quantidade total de automóveis com ar condicionado foi

estimada de acordo com a seção metodológica deste trabalho. O resultado da frota de veículos ano a ano pode ser visualizada na Figura 65.

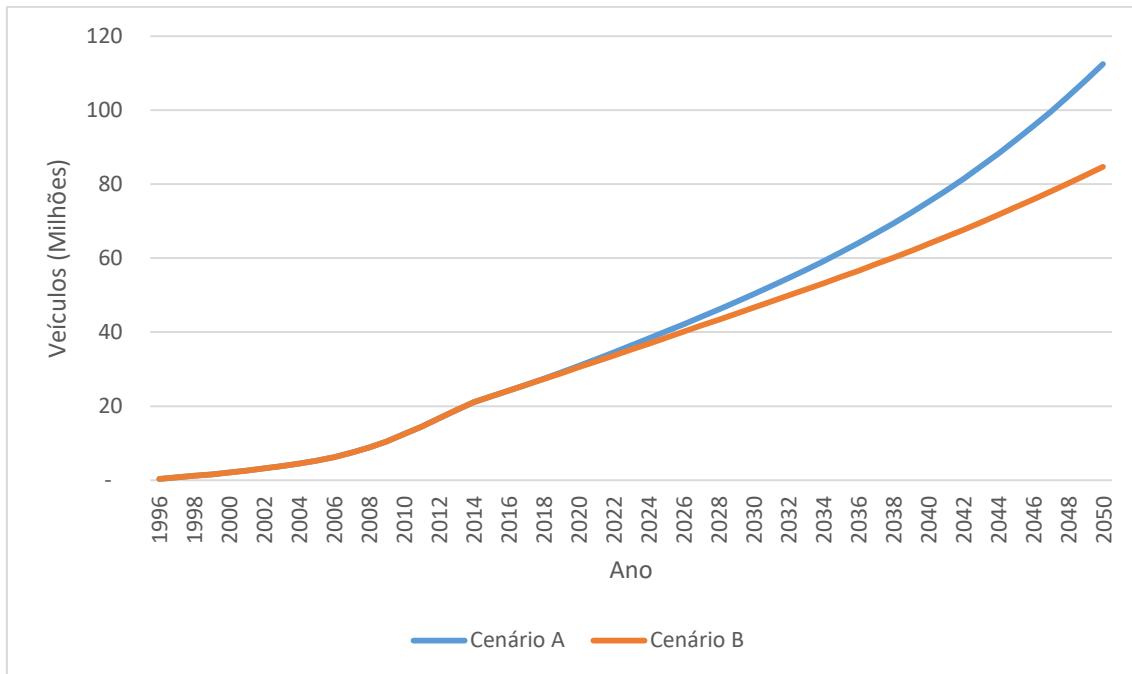


Figura 65. Frota de automóveis com ar condicionado

Fonte: Elaboração própria

Como somente a partir de 1996 automóveis passaram a utilizar HFC-134a, há um crescimento acentuado da frota de automóveis com ar condicionado até o ano de 2050, alcançando 106 milhões de unidades no Cenário A e 84 milhões no Cenário B, aproximadamente.

A quantidade total de emissões de gases fluorados causadores de efeito estufa proveniente dos equipamentos de ar condicionado em automóveis é apresentada Figura 66 e Figura 67.

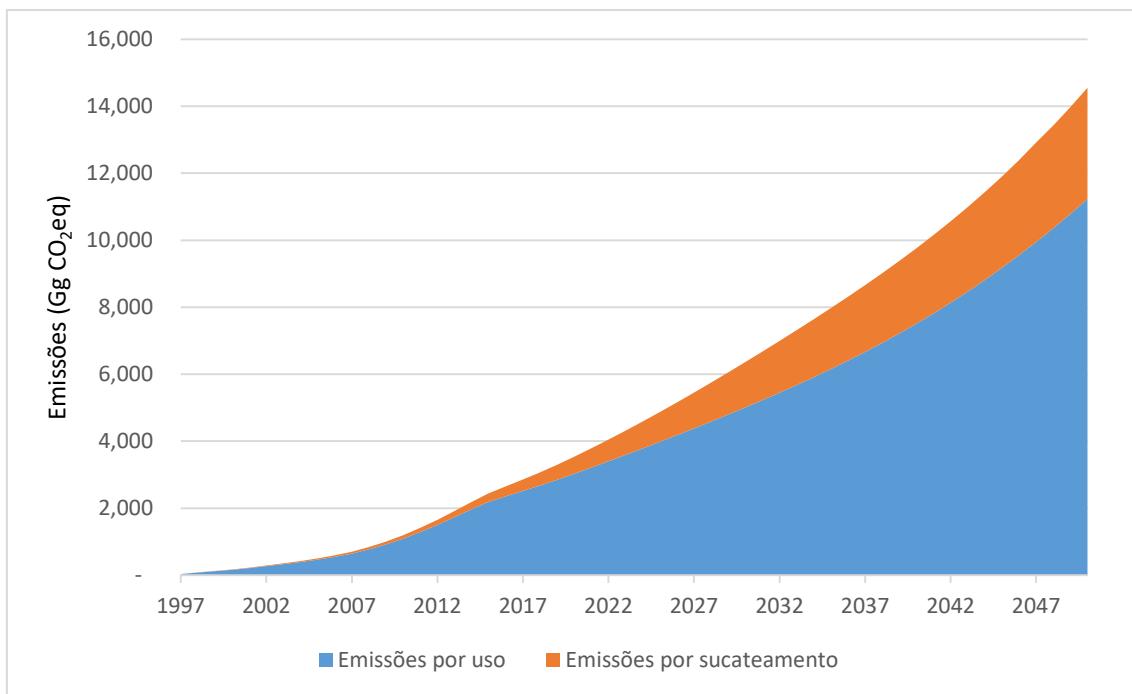


Figura 66. Emissões totais provenientes de ar condicionados em automóveis entre 1997 e 2050:
Cenário A

Fonte: Elaboração própria

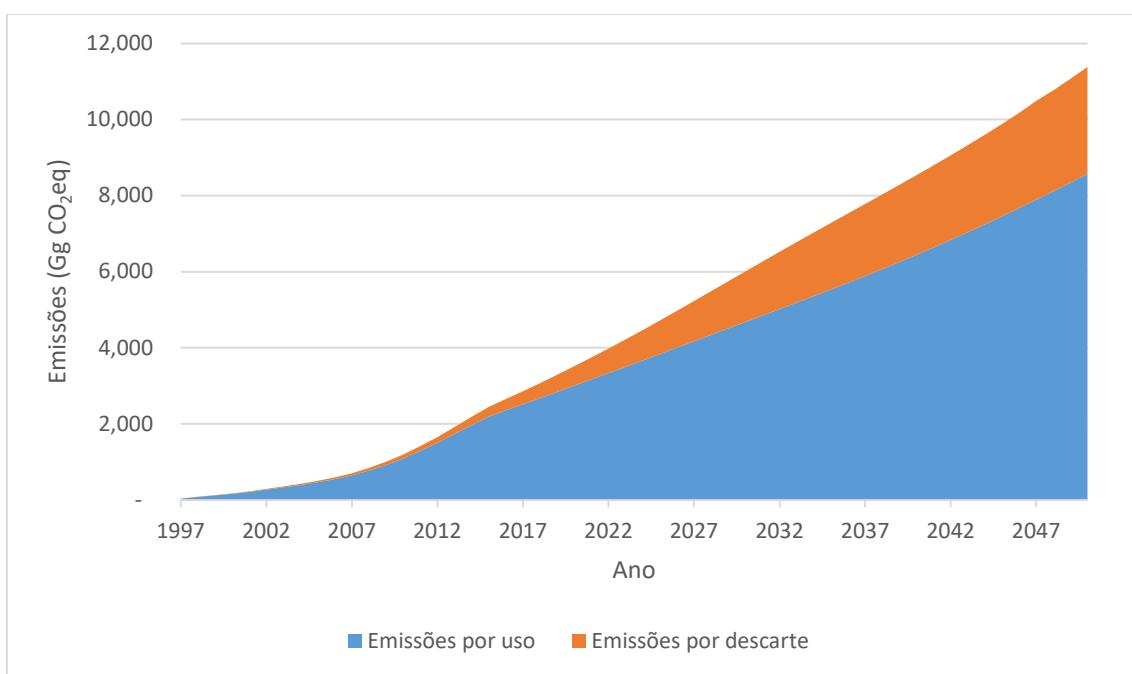


Figura 67. Emissões totais provenientes de ar condicionados em automóveis entre 1997 e 2050:
Cenário B

Fonte: Elaboração própria

No cenário de maior crescimento do PIB, Cenário A, as emissões de HFC-134a de atingem 14,5 mil GgCO₂ eq em 2050, e no segundo cenário as fugas são 23% menores, atingindo o valor de 11,4 mil GgCO₂ eq. Neste último ano, as emissões pelo

uso representaram cerca de 75% do total das emissões e ao longo do período estudado, elas correspondem a uma média de 84% do total de emissões nos dois cenários.

Como opção de mitigação, optou-se por utilizar como fluido refrigerante substituto o HFC-1234yf²³, com um custo de abatimento de 14,10 M€/Gg CO₂eq, calculado pela Equação 4-5 e Equação 4-6. O recolhimento ao fim de vida e o controle de vazamento apresentou custo de 25,55 M€/Gg CO₂eq. A Figura 68 e Figura 69 apresentam os resultados das emissões quando aplicadas medidas de mitigação nos aparelhos de ar condicionado dos automóveis.

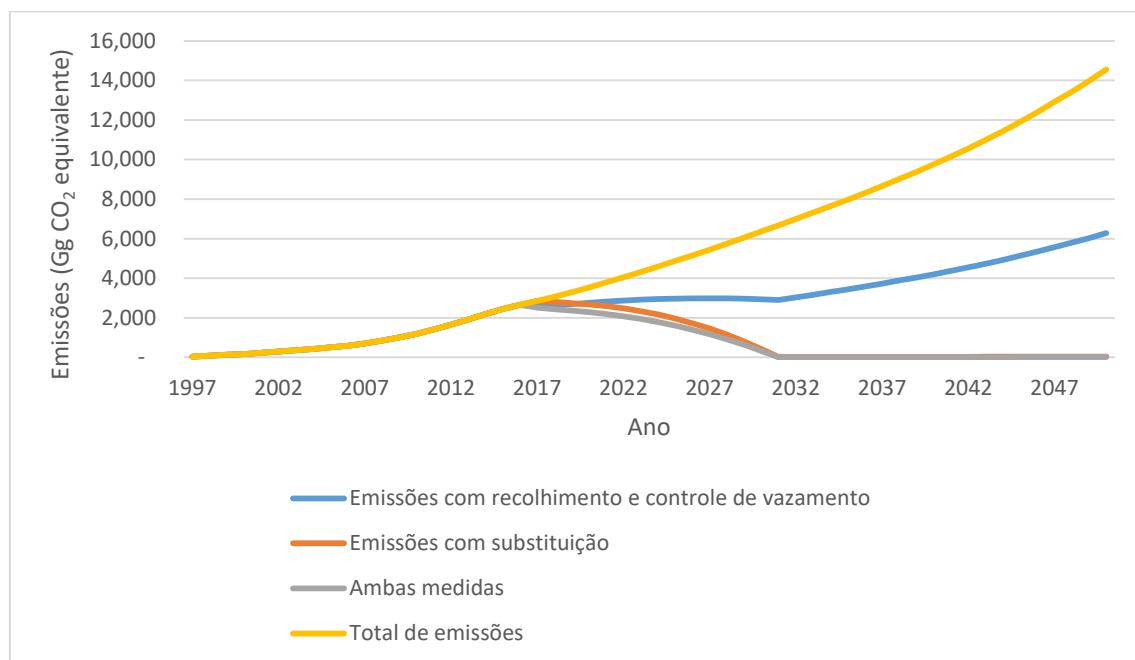


Figura 68. Emissões com medidas de controle provenientes de ar condicionados nos automóveis: Cenário A

Fonte: Elaboração própria

²³ Os custos de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o HFC-1234yf.

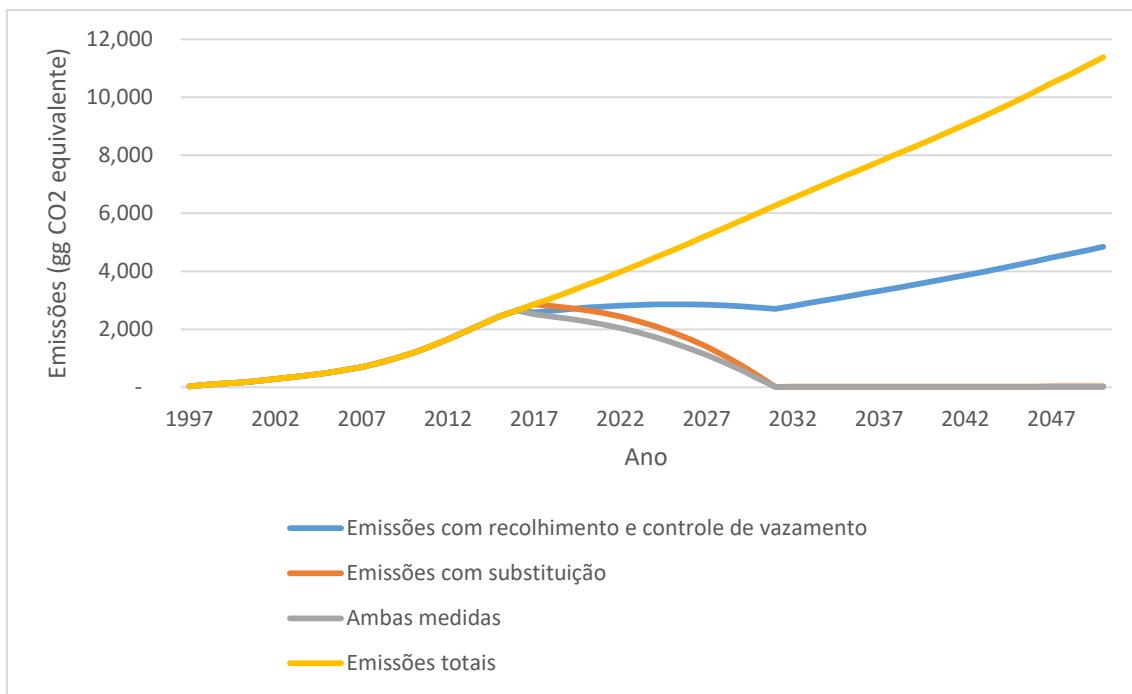


Figura 69. Emissões com medidas de controle provenientes de ar condicionados nos automóveis: Cenário B

Fonte: Elaboração própria

Em ambos cenários, o recolhimento do fluido com controle de vazamento apresentou uma redução média de 47% das emissões totais entre o período de 2017 e 2050. A substituição do fluido de refrigeração consegue, a partir de 2030, anular as emissões e em todo período estudado, esta opção diminuiu 79% de todas as emissões. Por fim, a implementação de ambas medidas no controle das emissões de ar condicionados em automóveis resultou em uma redução média de 82% do total de emissões, um pequeno acréscimo na mitigação dos gases fluorados, apenas 3% a mais do que a substituição do refrigerante.

A Figura 71 apresenta o resultado do cálculo da quantidade de comerciais leves licenciados entre 2016 e 2050.

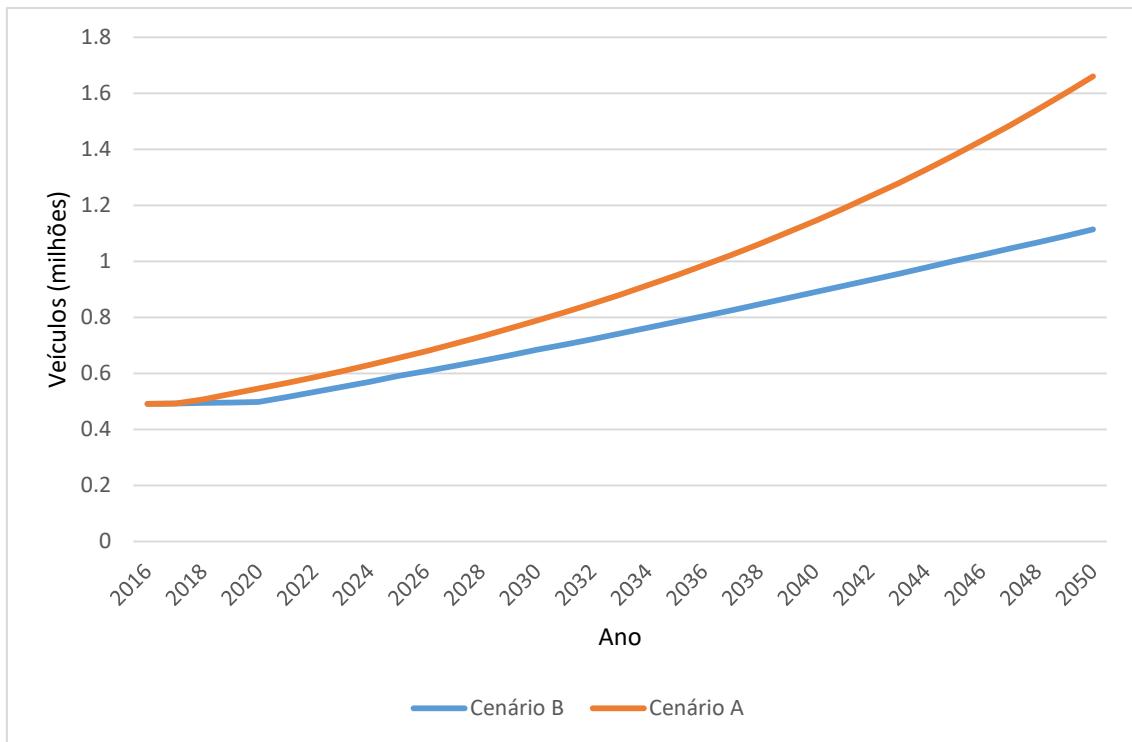


Figura 70. Comerciais leves licenciados anualmente entre 2016 e 2050 em ambos cenários de crescimento do PIB

Fonte: Elaboração própria

O Cenário A apresentou em 2050 uma quantidade de 1,66 milhões de unidades de comerciais leves, mais de 3 vezes o valor de veículos licenciados em 2016. Já o Cenário B, cujo crescimento do PIB é mais modesto, apresentou 1,11 milhões de unidades licenciadas no último ano estudado. Assim como nos automóveis, a quantidade total da frota com ar condicionado até 2050 foi estimada com base nas vendas, no sucateamento e na proporção de veículos com ar condicionado, como fora explicado na metodologia. A Figura 71 apresenta a frota de veículos comerciais leves entre 1996 e 2050.

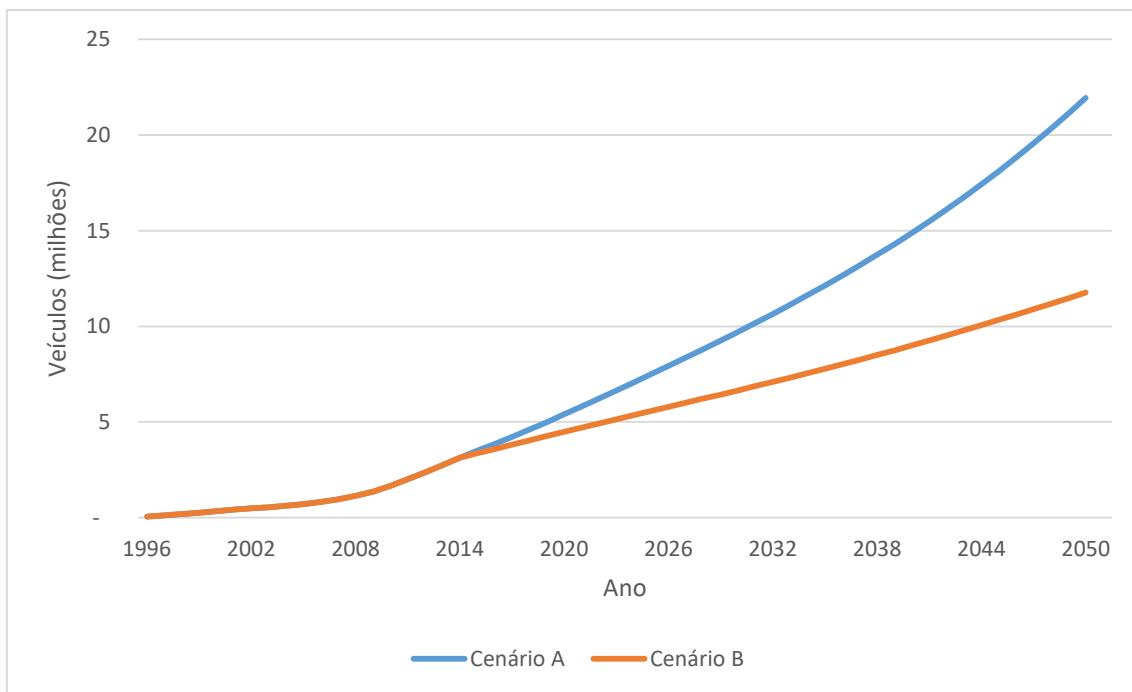


Figura 71. Frota de comerciais leves com aparelho de ar condicionado entre 1996 e 2050 em ambos cenários
 Fonte: Elaboração própria

No Cenário A, a frota de comerciais leves com ar condicionado apresenta um crescimento médio de 6% ao ano a partir de 2015, alcançando 21,9 milhões de unidades em 2050. Já no Cenário B, a taxa de crescimento anual da frota foi de 4% chegando a metade da frota do primeiro cenário, cerca de 11,5 milhões de veículos comerciais leves.

As emissões totais (emissões no uso e no sucateamento) provenientes de aparelhos de ar condicionado em comerciais leves em ambos cenários pode ser vista na Figura 72 e Figura 73, onde se destaca o crescimento acentuado destas fugas até 2050.

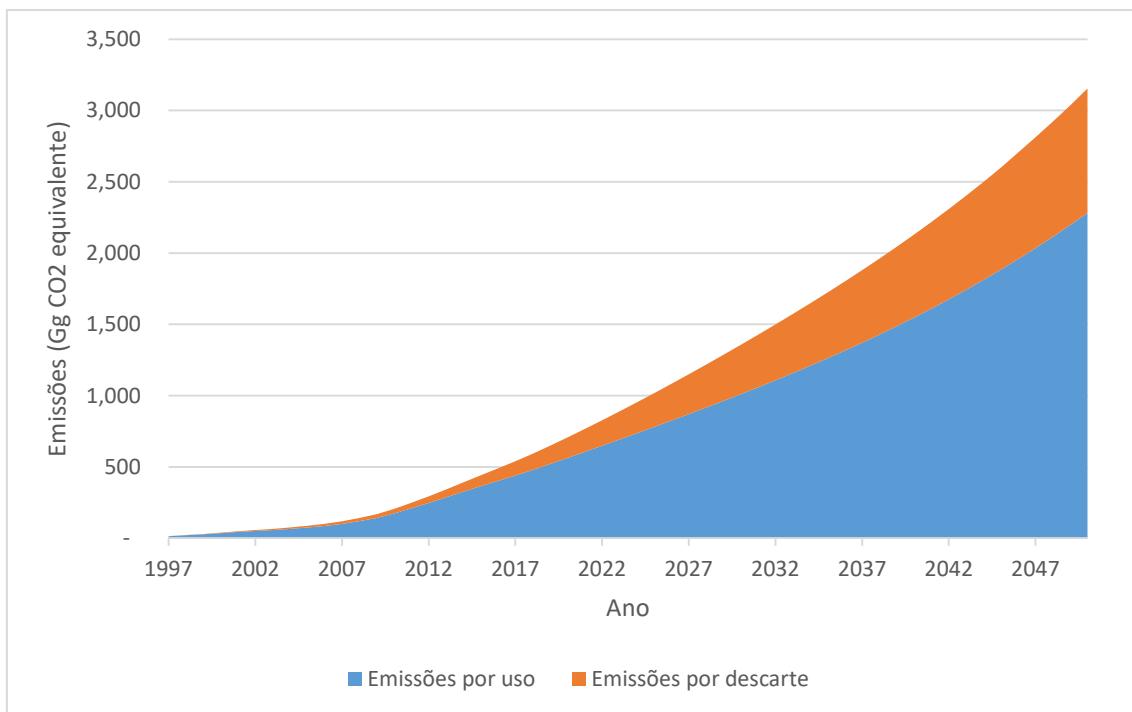


Figura 72. Emissões totais de aparelhos de ar condicionado em comerciais leves: Cenário A
Fonte: Elaboração própria

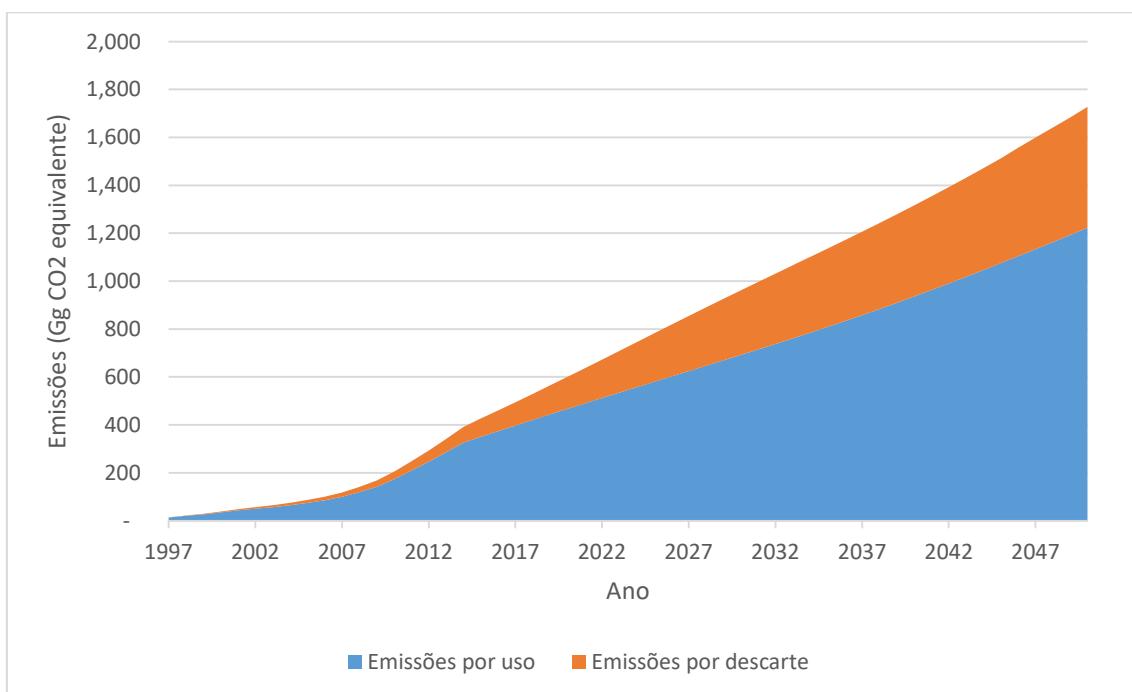


Figura 73. Emissões totais de aparelhos de ar condicionado em comerciais leves: cenário B

Fonte: Elaboração própria

No cenário de maior crescimento do PIB, Cenário A, as emissões totais de 441 Gg de CO₂ eq em 2015 para 3.154 Gg de CO₂ eq em 2050, quase o dobro de emissões apresentadas pelo Cenário B, que no mesmo ano atingiu cerca de 1.700 Gg de CO₂ eq. Nos dois cenários estudados as emissões provenientes da utilização de aparelhos de ar

condicionado em veículos comerciais leves representaram 78% das emissões totais ao longo do período estudado.

Para os veículos comerciais, será utilizado o HFC-1234yf²⁴, cujo custo de abatimento é igual a 14,10 M€/Gg CO₂eq calculado pela Equação 4-5 e pela Equação 4-6. Já o controle de vazamento acompanhado do recolhimento ao fim de vida apresentou custo de abatimento igual a 25,55 M€/GgCO₂eq, também calculado pelas equações citadas. A Figura 74 e a Figura 75 apresentam as emissões de gases fluorados dos veículos comerciais leves quando aplicadas as medidas de mitigação.

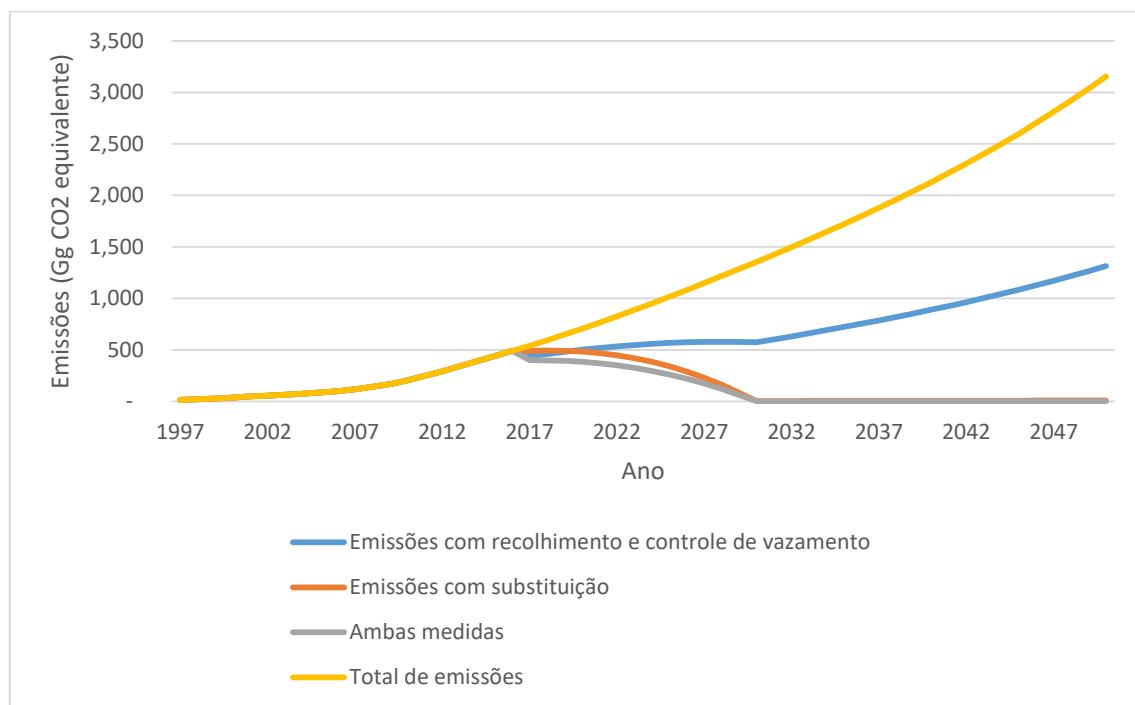


Figura 74. Emissões com medidas de controle em veículos comerciais leves: Cenário A
Fonte: Elaboração própria

²⁴ Os custos marginais de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o HFC-1234yf.

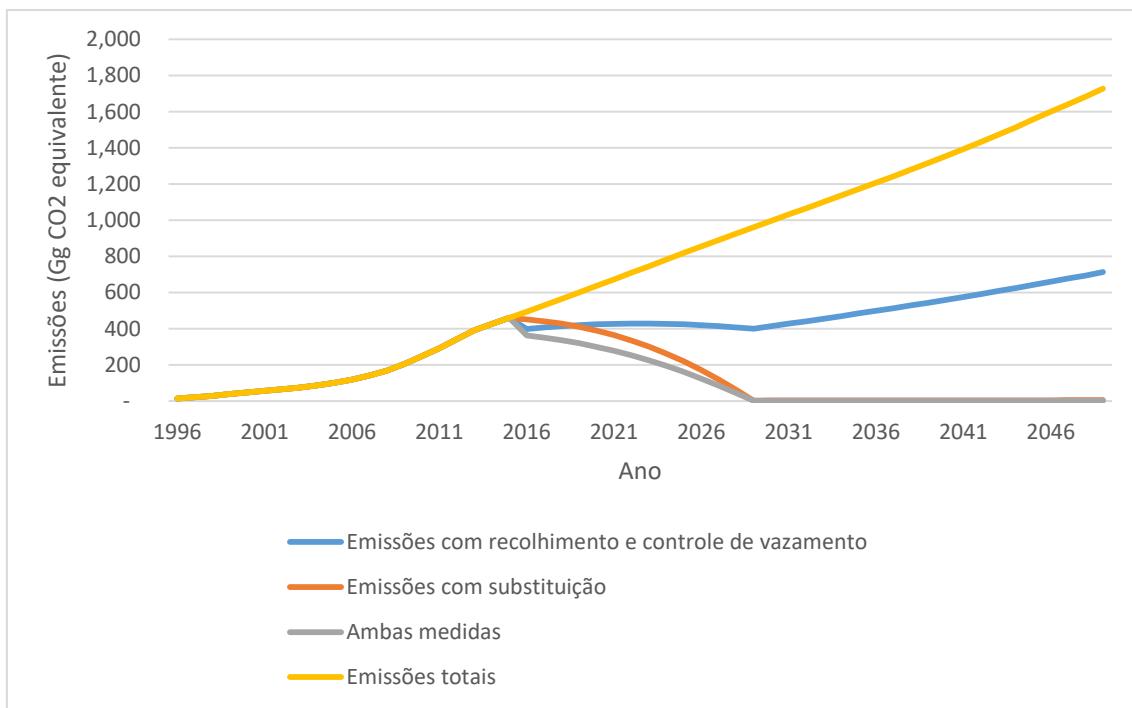


Figura 75. Emissões com medidas de controle em veículos comerciais leves: Cenário B

Fonte: Elaboração própria

Nos dois cenários, similar aos resultados encontrados nos automóveis, o controle de vazamento e o recolhimento conseguiu mitigar cerca de 50% das emissões totais entre 2017 e 2050. A substituição do fluido refrigerante por HFC-1234yf, reduziu a quantidade de gás emitido em, praticamente, 100% a partir de 2030 e entre 2017 e 2050, foram evitadas 82% do total de emissões sem medidas de controle. Novamente, a incorporação do controle de vazamento e o recolhimento ao fim de vida com a substituição do refrigerante não apresenta ganhos significativos: 85% de emissões a menos durante o período estudado, 3% a mais quando só é utilizado o outro fluido de refrigeração.

Utilizando a elasticidade renda da demanda dos ônibus e o PIB entre 2016 e 2050, foi projetada a quantidade de ônibus licenciados anualmente, como pode ser visto na Figura 76.

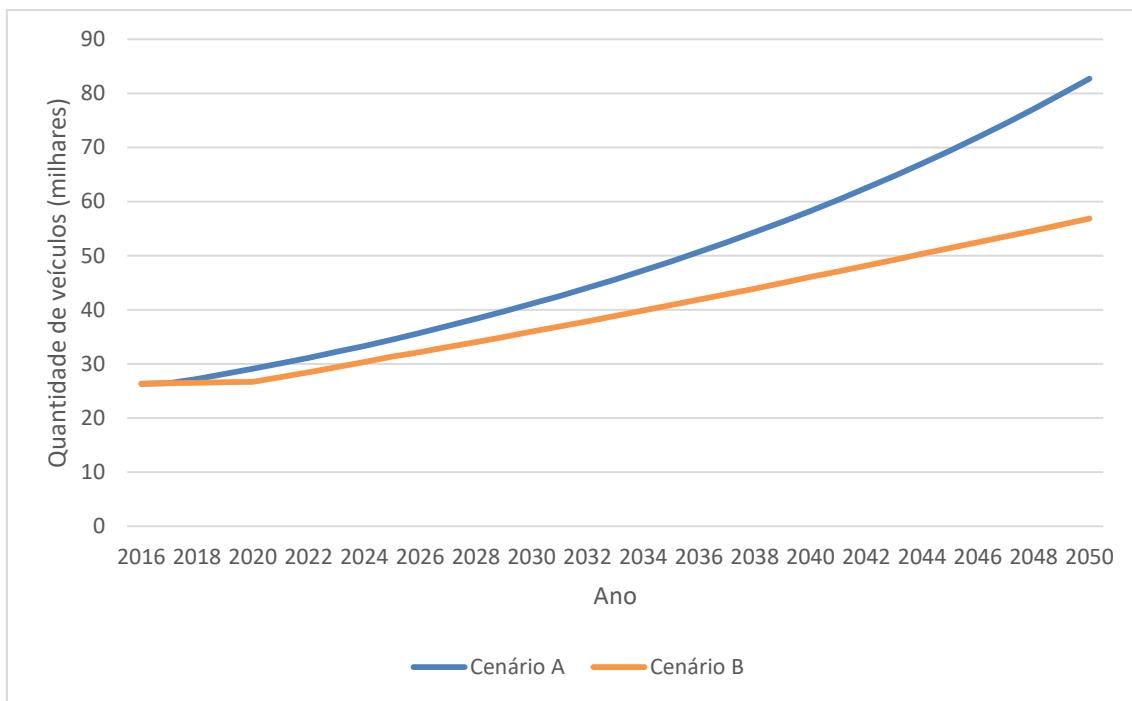


Figura 76. Quantidade de ônibus licenciados entre 2016 e 2050 em ambos cenários de crescimento do PIB

Fonte: Elaboração própria

Em 2016 a quantidade de ônibus licenciados foi de 26 mil unidades, aproximadamente. O Cenário A, apresentou o crescimento médio anual de 4% resultando em 82 mil unidades licenciadas em 2050. Já no cenário cujo crescimento do PIB é mais moderado, em 2050 foram licenciadas cerca de 56 mil unidades.

A frota de ônibus urbanos e ônibus rodoviários com ar condicionado foi projetada utilizando a proporção destes veículos que possuem ar condicionado, as vendas anuais e o sucateamento, como fora explicado na seção metodológica. A Figura 77 e a Figura 78 apresentam estes resultados.

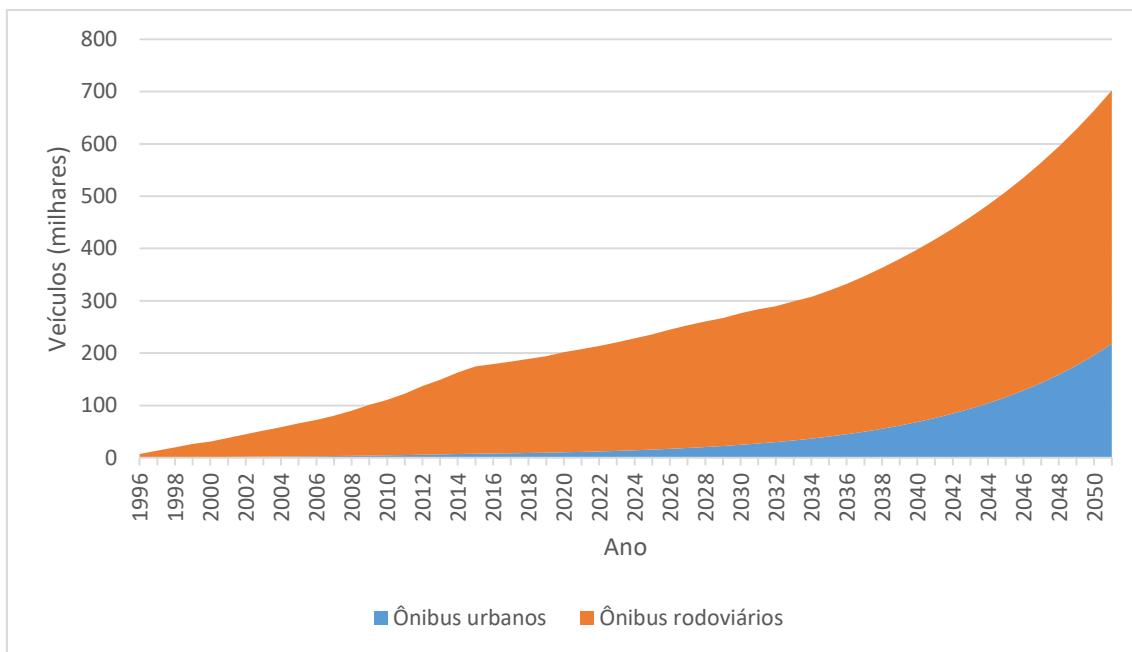


Figura 77. Frota de ônibus urbanos e rodoviários com ar condicionado: Cenário A

Fonte: Elaboração própria

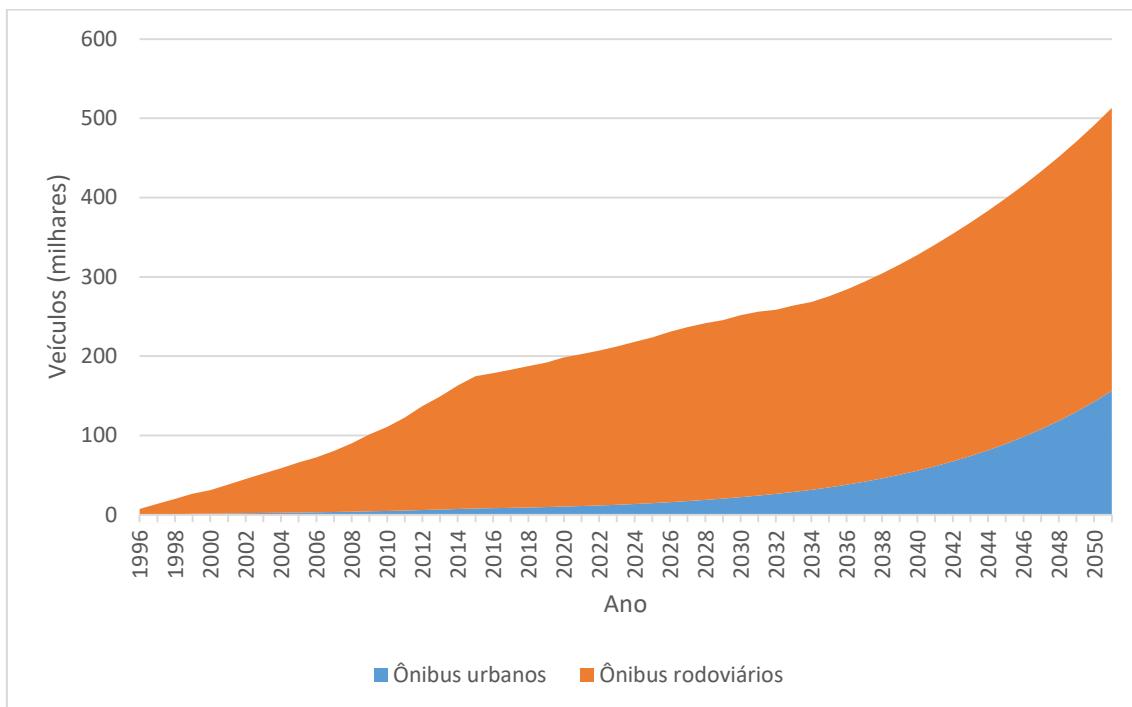


Figura 78. Frota de ônibus urbanos e rodoviários com ar condicionado entre 1996 e 2050

Fonte: Elaboração própria

Em 2050, a frota de ônibus com ar condicionado estimada foi de 702 mil unidades no Cenário A e 513 mil veículos no Cenário A. Em boa parte do período estudado, a participação de ônibus urbanos com ar condicionado é consideravelmente menor do que a dos ônibus rodoviários, em média, a parcela destes veículos urbanos corresponde a 10% do total.

A Figura 79 e a Figura 80 mostram as emissões por uso e emissões por descarte provenientes de aparelhos de ar condicionado em ônibus para o Cenário A e Cenário B, respectivamente entre 1996 e 2050.

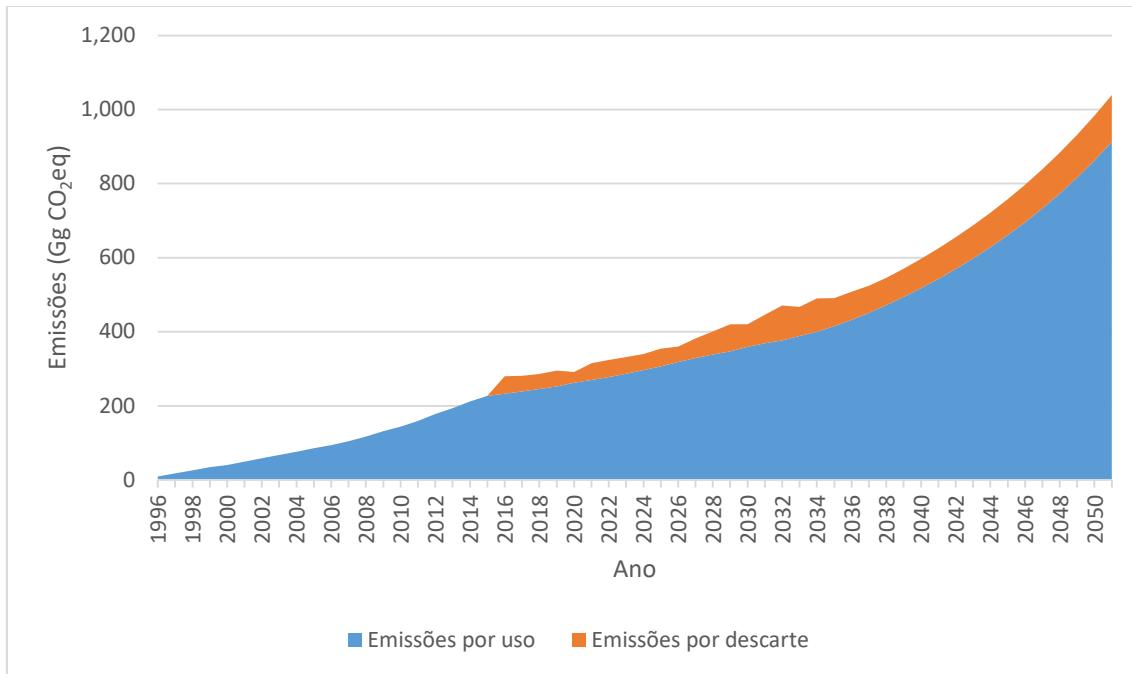


Figura 79. Emissões de aparelhos de ar condicionado veiculares em ônibus: Cenário A

Fonte: Elaboração própria

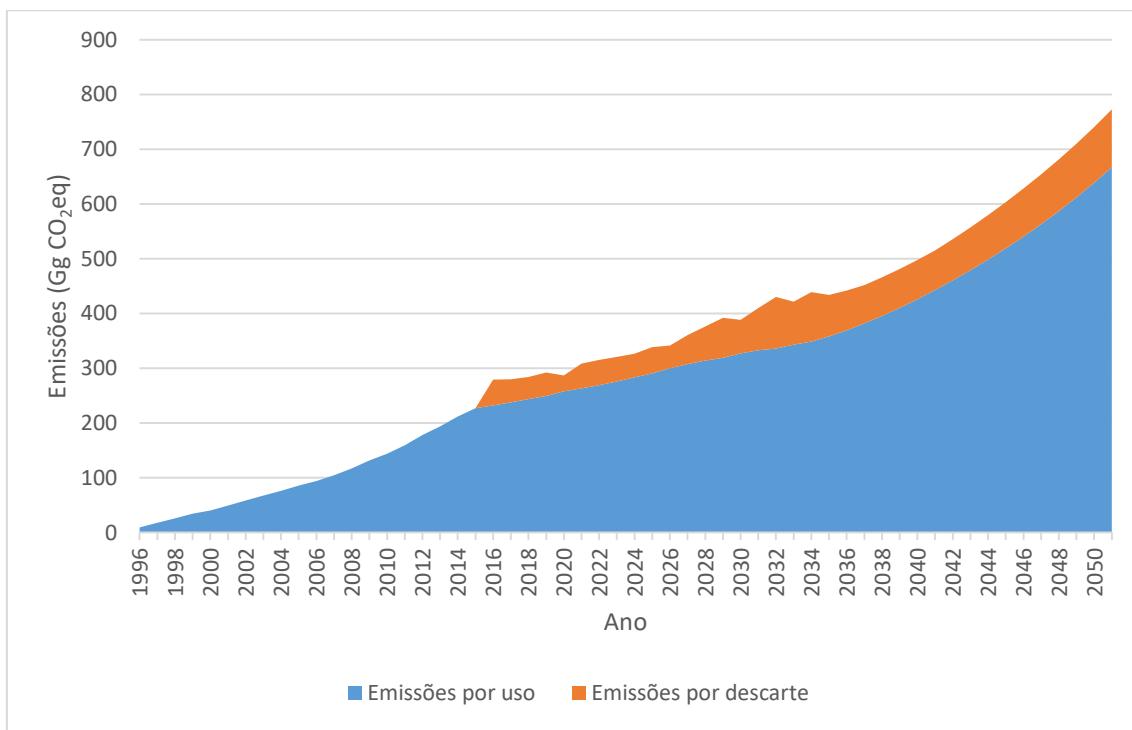


Figura 80. Emissões de aparelhos de ar condicionado veiculares em ônibus: Cenário B

Fonte: Elaboração própria

De aproximadamente 200 GgCO₂eq em 2015, As emissões provenientes de ar condicionados em ônibus estimadas atingiram 1.039 GgCO₂ eq para o Cenário A e 773 GgCO₂ eq no Cenário B, em 2050. Note que, dado o tempo de vida médio destes veículos, as primeiras emissões por sucateamento só começam a ocorrer em 2016, 20 anos depois dos primeiros ônibus com ar condicionado entrarem no mercado, sendo estas emissões responsáveis por apenas 15% do total das fugas entre 2016 e 2050.

O refrigerante HFC-1234yf²⁵ será utilizado em substituição ao HFC-134a, com um custo de abatimento de 14,83 M€/GgCO₂eq calculado pela Equação 4-5 e Equação 4-6. Já os custos de mitigação do controle de vazamento com o recolhimento ao fim de vida foi de 25,55 M€/GgCO₂eq. As emissões quando aplicadas medidas de mitigação em relação aos equipamentos de ar condicionado em ônibus são apresentadas na Figura 81 e na Figura 82.

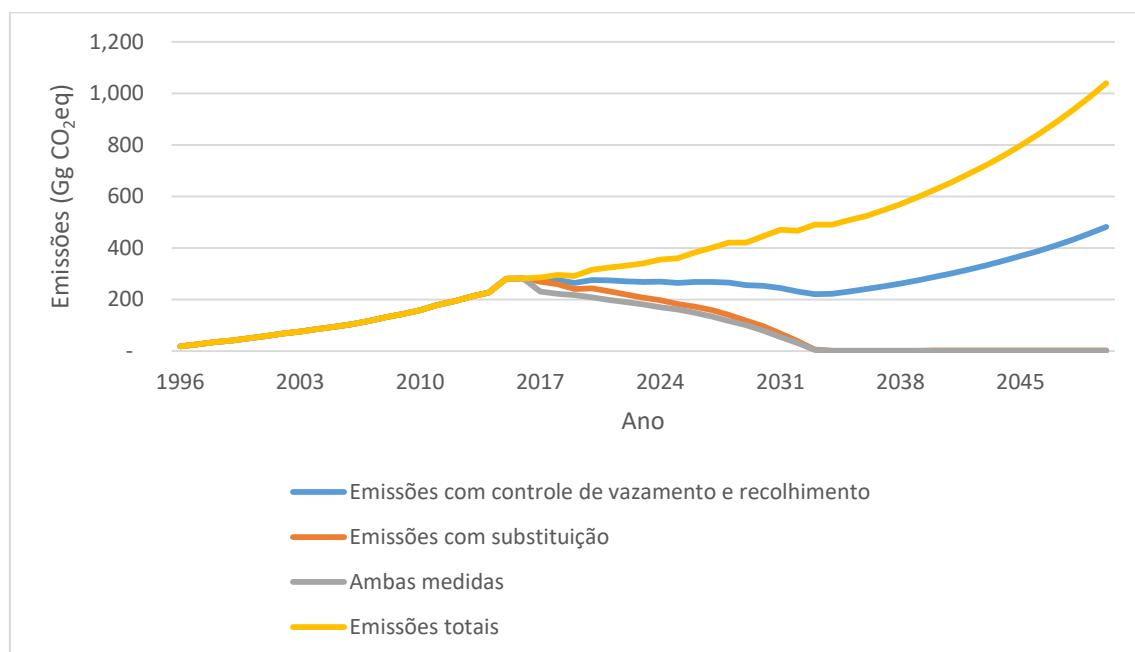


Figura 81. Emissões de ar condicionados com medidas de controle - Ônibus: Cenário A
Fonte: Elaboração própria

²⁵ Os custos marginais de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o HFC-1234yf.

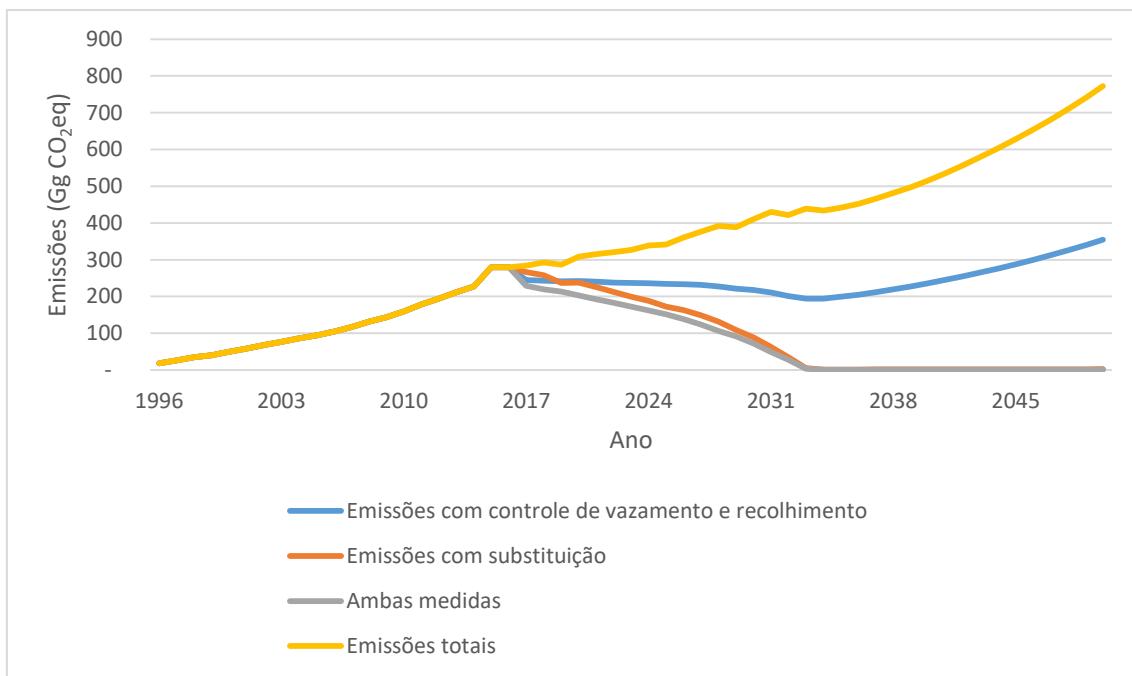


Figura 82. Emissões de ar condicionados com medidas de controle - Ônibus: Cenário B

Fonte: Elaboração própria

Ao aplicar a medida que visa controlar os vazamentos e recolher os refrigerantes fluorados, obteve-se uma redução média, em ambos cenários, de 44% do total de emissões entre 2017 e 2050. Com a substituição do refrigerante HFC-134a, houve uma redução significativa da quantidade emitida, em termos de CO₂ eq, cerca de 75% em todo período estudado e praticamente 100% a partir de 2034. Assim como nos outros veículos, a incorporação da redução do vazamento e recolhimento do refrigerante abateu 7% a mais que a substituição entre 2017 e 2034, posterior a esta data não houve acréscimos significativos em termos de redução de emissões.

Com base na elasticidade de caminhões e no desenvolvimento do PIB foram projetados o licenciamento destes veículos anualmente até 2050. A Figura 83 apresenta estes resultados.

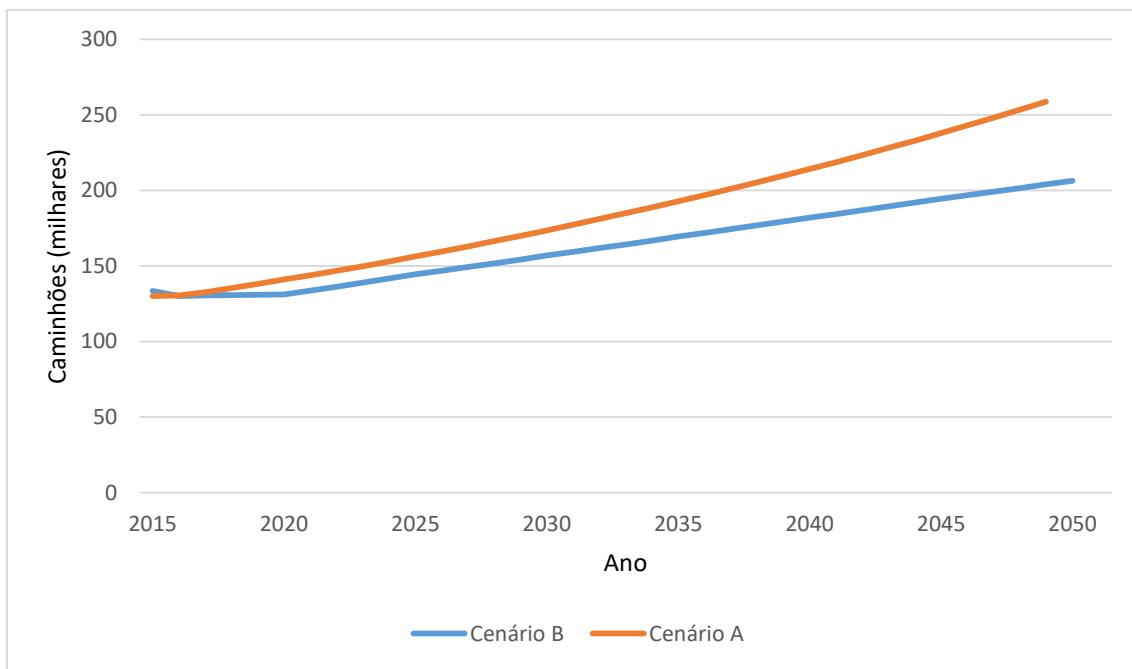


Figura 83. Caminhões licenciados anualmente entre 2015 e 2050.

Fonte: Elaboração própria

Utilizando estas vendas apresentadas acima, no sucateamento e no percentual com ar condicionado deste tipo de veículos, as frotas totais de caminhões e caminhões frigoríficos foram projetadas até o ano de 2050. A Figura 84 e Figura 85 apresenta estes resultados.

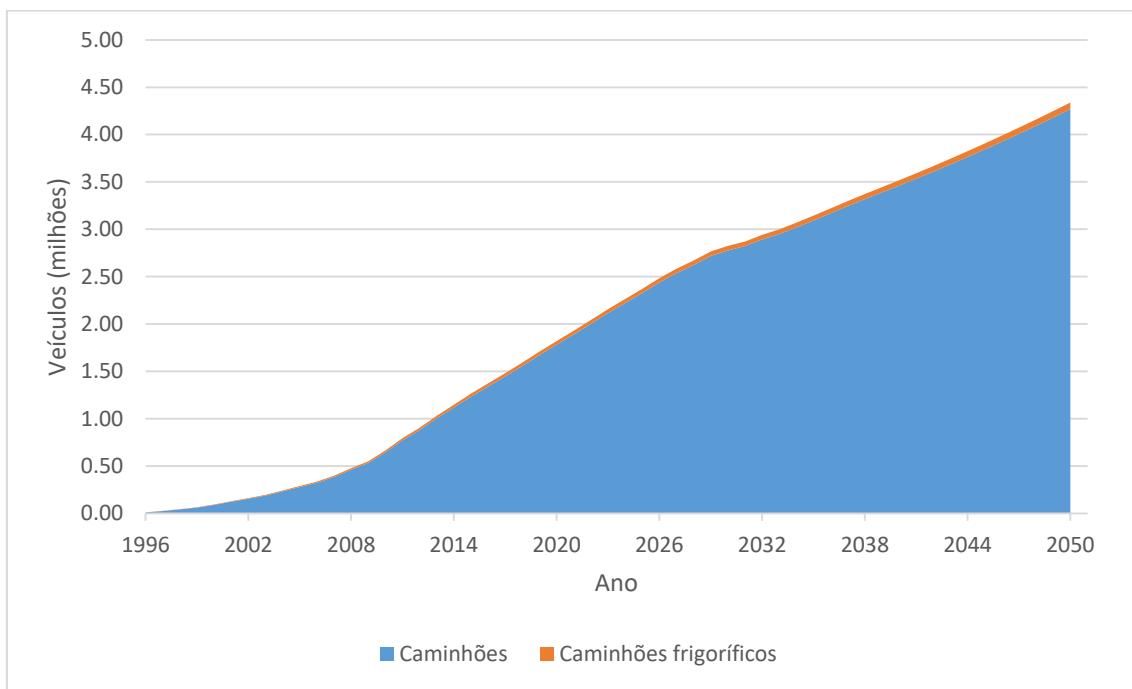


Figura 84. Frota de caminhões com ar condicionado e caminhões frigoríficos – 1996 a 2050 - Cenário A

Fonte: Elaboração própria

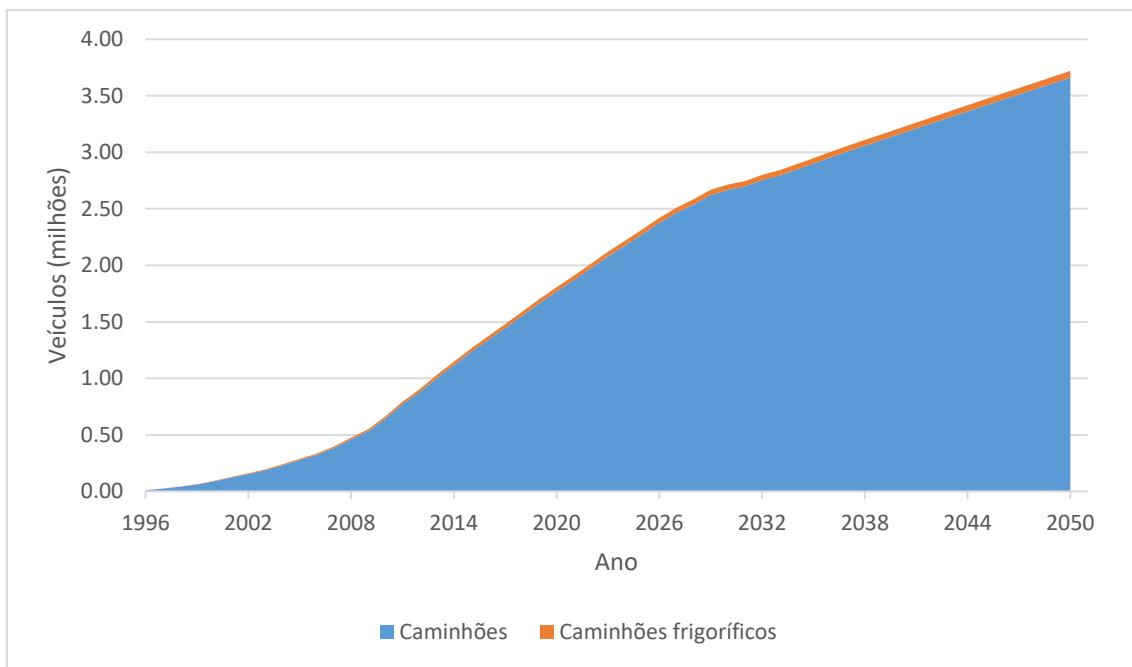


Figura 85. Frota de caminhões com ar condicionado e caminhões frigoríficos – 1996 a 2050 - Cenário B

Fonte: Elaboração própria

No Cenário A, estima-se que a frota de caminhões e caminhões frigoríficos cresça, de 1,23 milhões de unidades em 2015, para 4,34 milhões em 2050, um crescimento médio de 4% ao ano,. Já no Cenário B, no último ano projetado a frota de caminhões deverá alcançar o nível de 3,7 milhões de veículos, isto representa um crescimento médio anual de 3%.

O total de emissões provenientes dos aparelhos de ar condicionado em caminhões e dos sistemas de refrigeração nestes veículos frigoríficos é apresentada na Figura 86 e Figura 87.

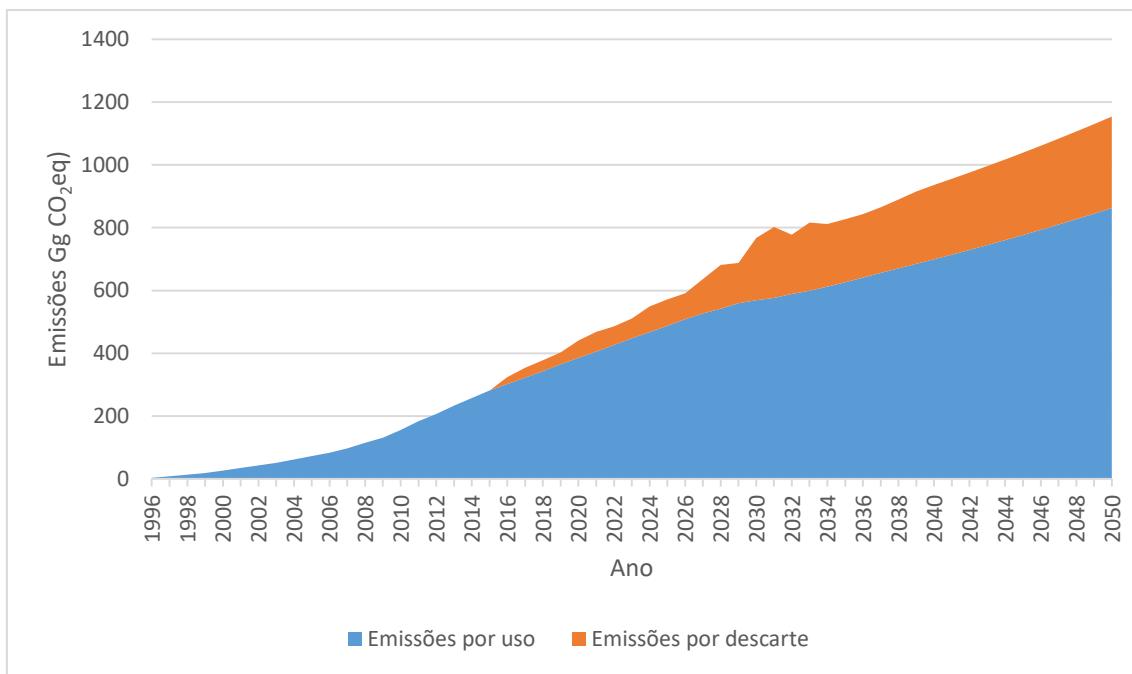


Figura 86. Emissões de ares condicionados em caminhões e caminhões frigoríficos: Cenário A

Fonte: Elaboração própria

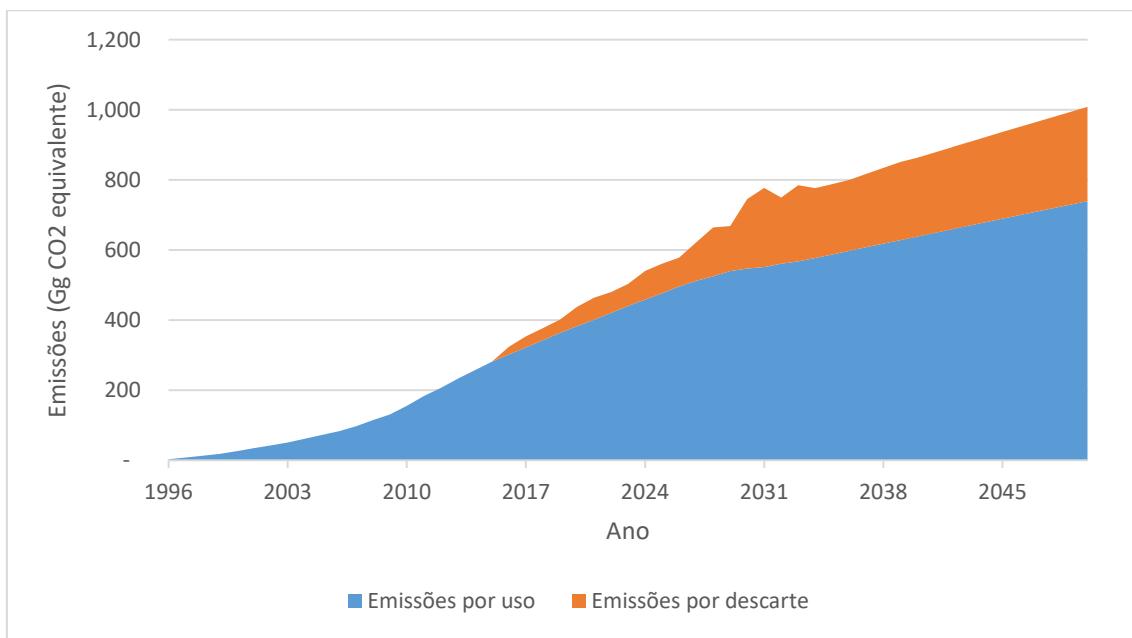


Figura 87. Emissões de ares condicionados em caminhões e caminhões frigoríficos: Cenário B

Fonte: Elaboração própria

As emissões provenientes de ar condicionados nos caminhões e dos sistemas de refrigeração em caminhões frigoríficos estimadas em 2050 equivalem a 1.154 Gg, em CO₂ eq, no Cenário A e 1.008 Gg de CO₂ eq no Cenário B. Estima-se que as emissões por uso neste setor correspondam a 79% do total, sendo responsáveis por 74% do total das fugas no último ano estudado.

As emissões quando aplicadas medidas de controle são apresentadas na Figura 88 e na Figura 89. O refrigerante substituto utilizado para mitigar as emissões de gases fluorados nos aparelhos de ar condicionado dos caminhões será o R744²⁶ (dióxido de carbono), com um custo de abatimento igual a 12,37 M€/GgCO₂eq, calculado pela Equação 4-5 e Equação 4-6. Já o custo referente ao recolhimento ao fim de vida e controle de vazamento calculado pelas mesmas equações foi de 25,55 M€/GgCO₂eq.

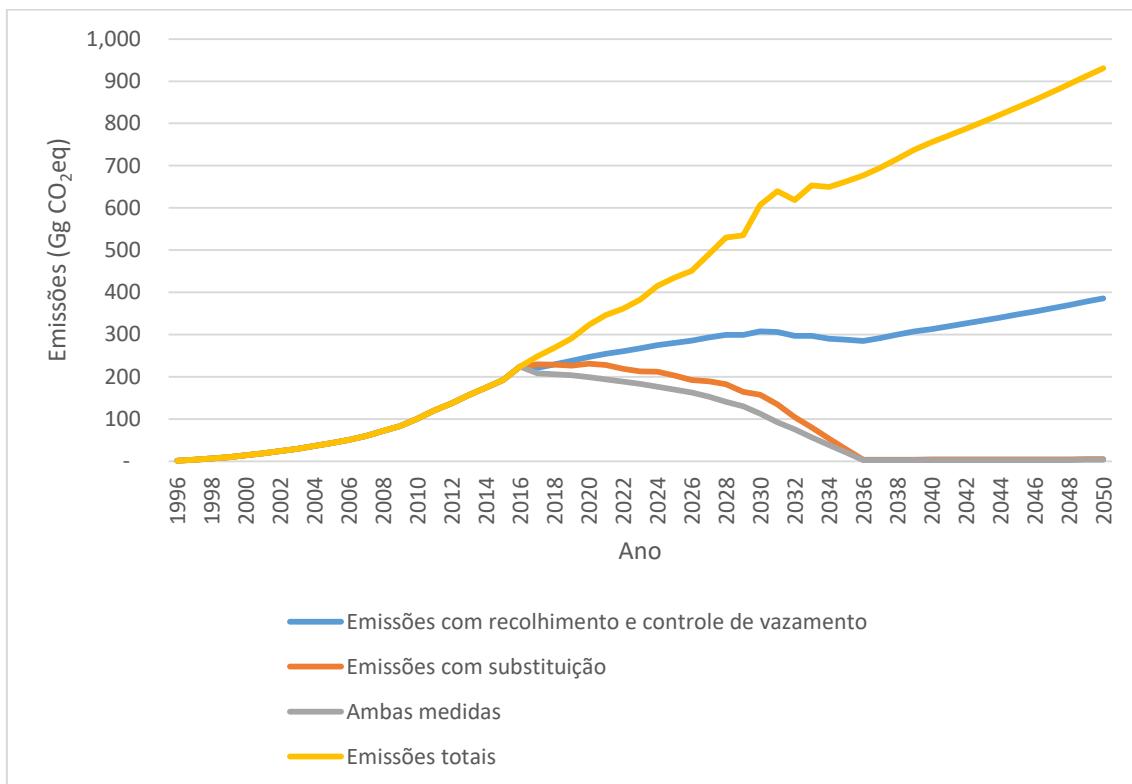


Figura 88. Emissões com medidas de controle em ar condicionados de caminhões: Cenário A
Fonte: Elaboração própria

²⁶ Os custos marginais de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o R744.

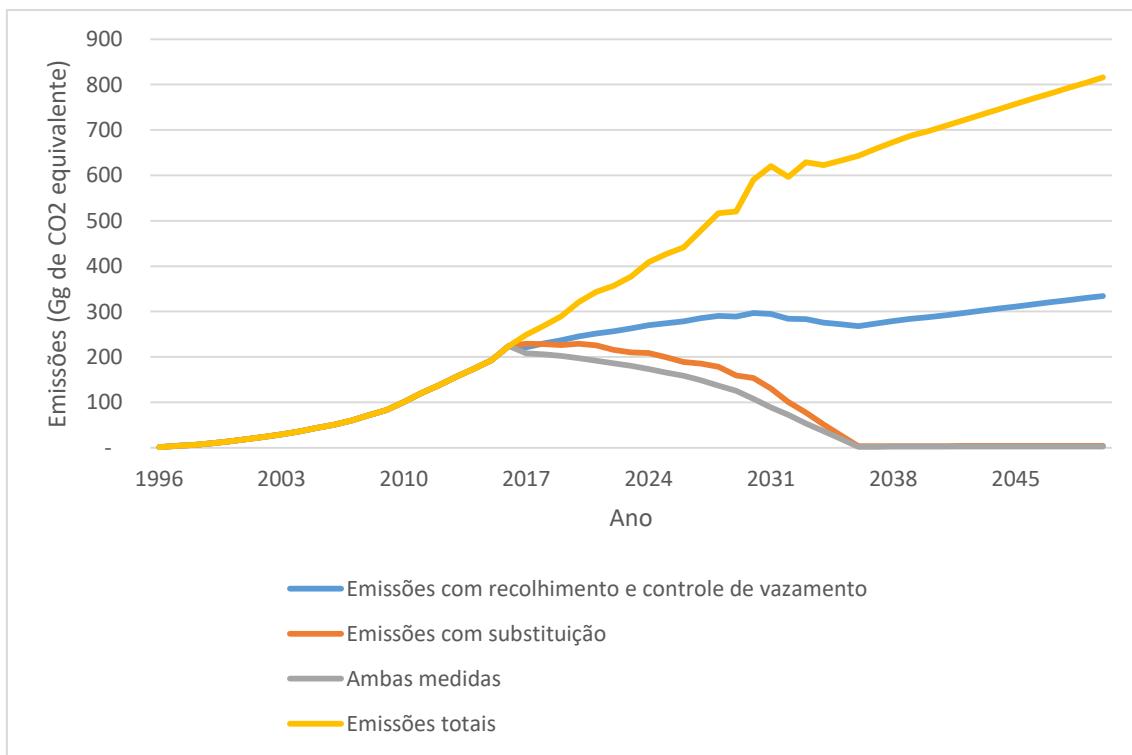


Figura 89. Emissões com medidas de controle em ar condicionados de caminhões: Cenário B
Fonte: Elaboração própria

O controle de vazamento com recolhimento ao fim de vida do ar condicionado em caminhões foi capaz de reduzir, em média no período entre 2017 e 2050, 51% do total das emissões de gases fluorados e no ano de 2050, esta redução foi de 59%. Já a substituição do refrigerante pode abater 83% das emissões totais entre 2017 e 2050 e partir de 2036, 99% dos gases foram mitigados, em termos de CO₂eq. A substituição do fluido refrigerante somada ao controle de vazamento e o recolhimento ao fim de vida reduziu 86% do total de emissões entre 2017 e 2050.

Em relação ao transporte refrigerado feito por caminhões frigoríficos, a Figura 90 e a Figura 91 apresentam o resultado das emissões com e sem a implementação das medidas de mitigação. O refrigerante HFC-152²⁷ apresentou menor custo de mitigação, 3,55 M€/GgCO₂eq, dentre as opções possíveis com base nos cálculos da Equação 4-5 e Equação 4-6. Já os custos do recolhimento ao fim de vida e o controle de vazamento foram de 96,78 M€/GgCO₂eq.

²⁷ Os custos de mitigação para todas as opções de fluido refrigerante substituto são apresentadas no Anexo I. Conforme disposto no texto, o refrigerante que apresentou menores custos foi o HFC-152.

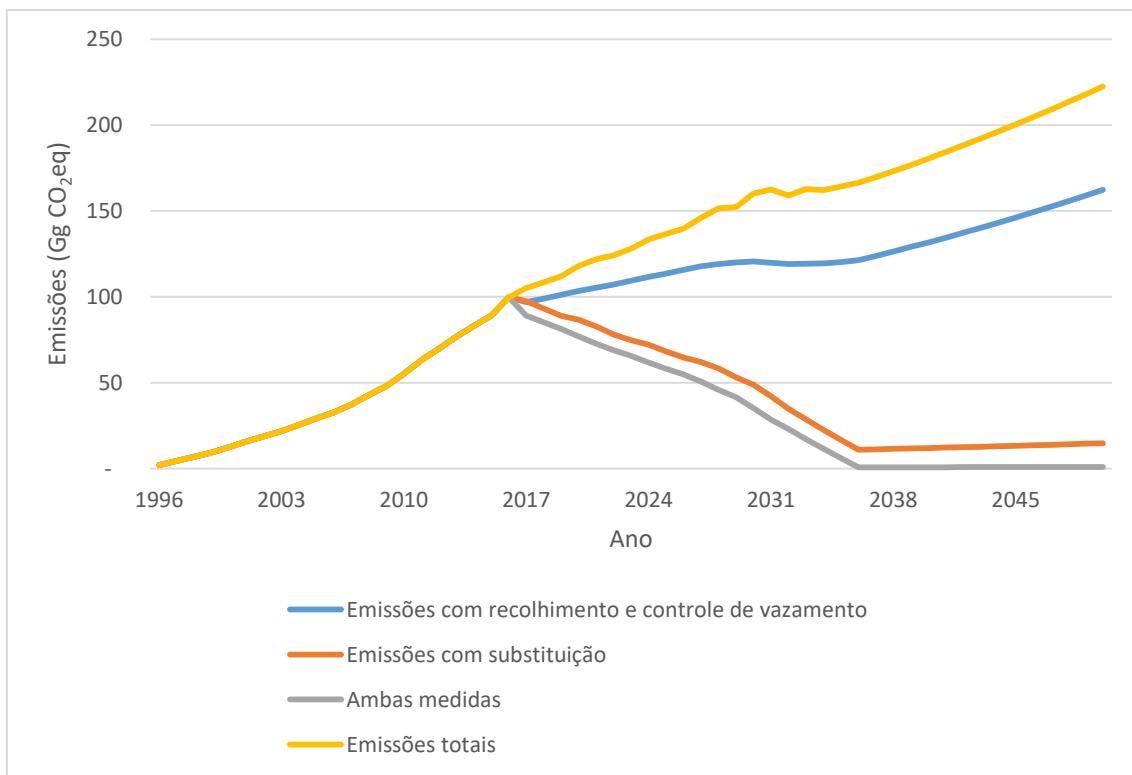


Figura 90. Emissões com medidas de controle em transporte refrigerado: Cenário A
Fonte: Elaboração própria

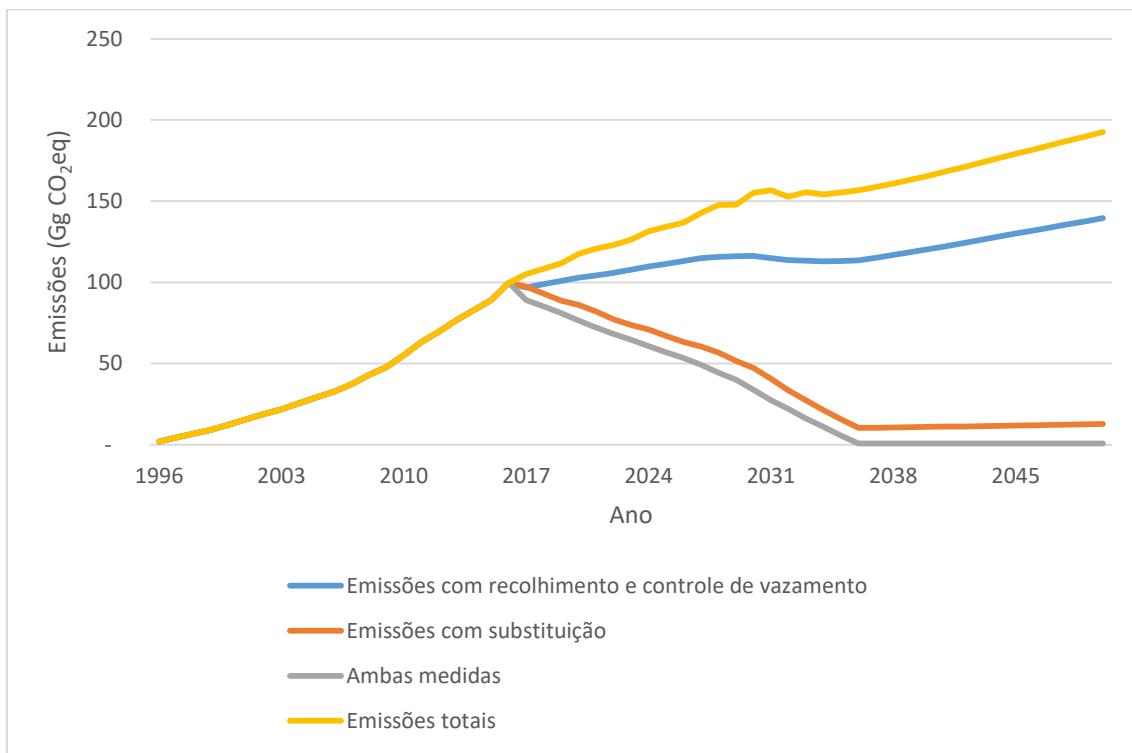


Figura 91. Emissões com medidas de controle em transporte refrigerado: Cenário B
Fonte: Elaboração própria

A quantidade de gás fluorado abatido, em média, anualmente pelo controle de vazamento e pelo recolhimento ao fim de vida foi de apenas 23% das emissões totais.

Com a substituição do refrigerante fluorado dos caminhões frigoríficos, emitiu-se, aproximadamente, 74% a menos, chegando a um máximo de 93% da quantidade total abatida, em termos de CO₂ eq, em 2036. Somente utilizando o controle de vazamento com o recolhimento ao fim de vida somado a substituição do refrigerante fluorado, atingiu-se um nível de 100% de redução das emissões, que ocorreu a partir de 2036. Estas medidas combinadas emitiram 84% do total de emissões quando não é aplicado nenhum controle.

5.6 Produção de alumínio

Conforme foi mencionado na seção metodológica, a produção de alumínio primário foi mantida constante até 2050, sendo assim as emissões provenientes deste setor também se mantiveram constantes, como mostra a Figura 92. As emissões não foram separadas em cada um dos cenários pois estas não estão correlacionadas com o PIB brasileiro, desta maneira, considerou-se as fugas iguais no Cenário A e B.

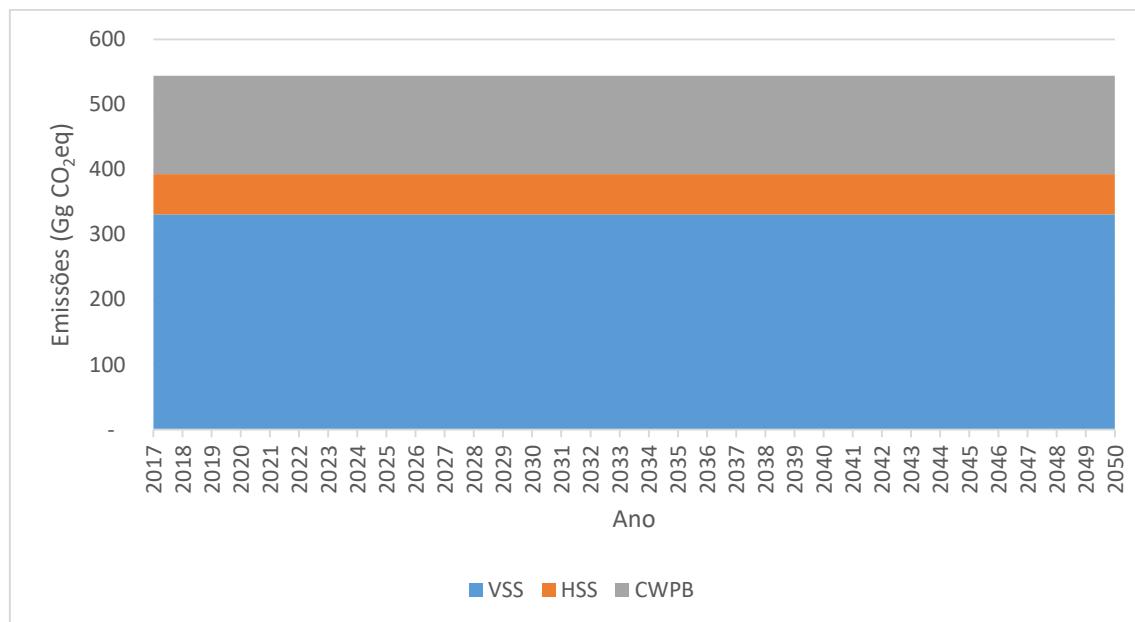


Figura 92. Emissões totais de gases fluorados na produção de alumínio primário entre 2017 e 2050
Fonte: Elaboração própria

As emissões totais de gases fluorados totalizaram 6.231 Gg de CO₂ eq anualmente entre 2017 e 2050, sendo 89% CF₄ e o restante C₂F₆. Com 64% do total das fugas, a tecnologia CWPB foi a que mais contribuiu para as emissões destes gases, seguido da VSS, com 30% e por fim, HSS com 6% do total.

Em relação as medidas de controle utilizadas, a Figura 93, apresenta os resultados da quantidade de gás emitido quando a tecnologia mudou para PFPB ou quando houve uma melhoria no controle do processo.

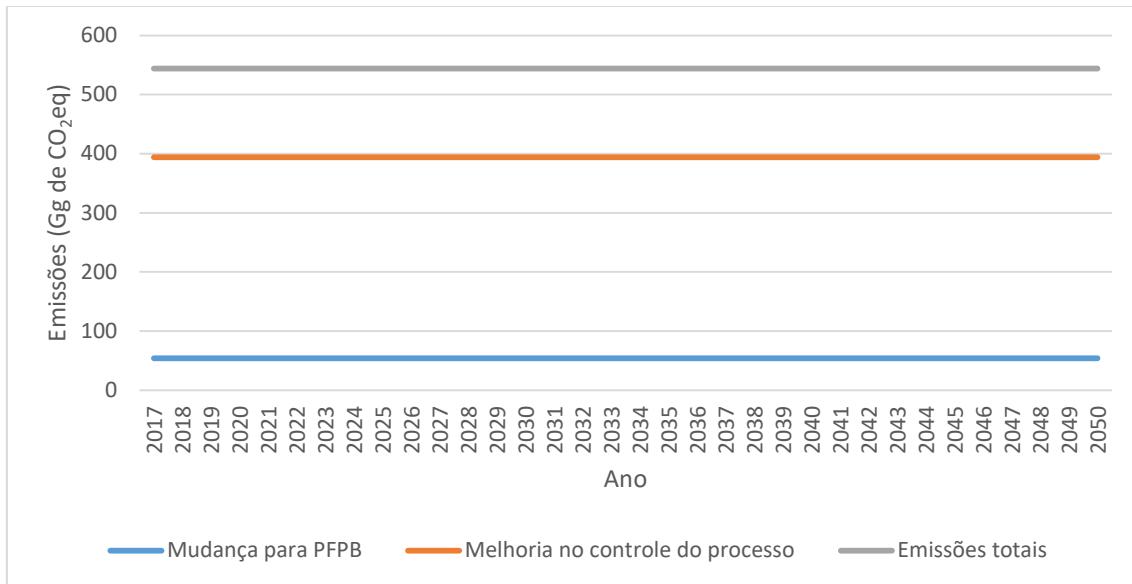


Figura 93. Emissões com abatimento de gases fluorados durante a produção de alumínio primário entre 2017 e 2050.

Fonte: elaboração própria

Quando implementada uma melhoria do controle da produção, houve uma redução de 27% no total das emissões de gases fluorados a um custo de abatimento de 18,07 M€/GgCO₂eq para a tecnologia CWPB e para VSS, este valor foi de 40.09 M€/GgCO₂eq.

Já a mudança da tecnologia para PFPB, apresentou reduções mais significativas: cerca de 88% das emissões foram abatidas com a utilização desta medida a um custo de 18 M€/GgCO₂eq, quando a tecnologia em questão é CWPB e 364 M€/Gg CO₂eq.

5.7 Setor elétrico

A Figura 94 apresenta as emissões de hexafluoreto de enxofre nos equipamentos de transmissão e distribuição elétrica, bem como as emissões com a medida de controle que visa reduzir as emissões durante o uso e o recolhimento ao fim de vida. Lembrando ao leitor que estas emissões estão relacionadas ao consumo de energia elétrica sendo assim estas emissões foram consideradas iguais em ambos cenários pois o PIB não as influenciaria.

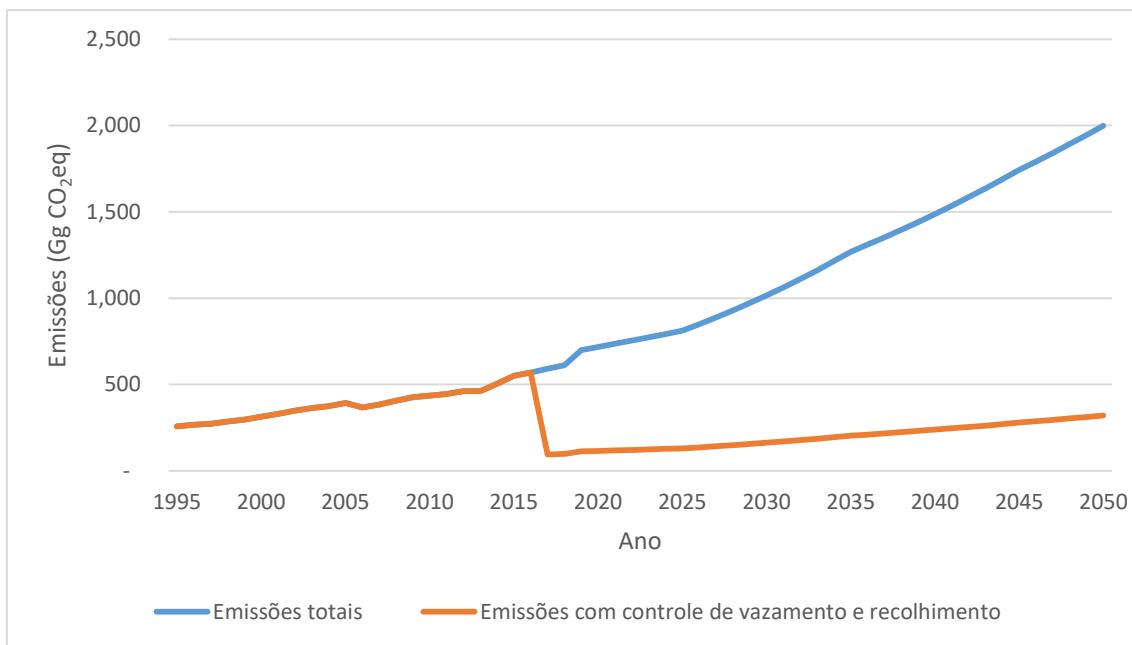


Figura 94. Emissões de hexafluoreto de enxofre proveniente de equipamentos de transmissão e distribuição elétrica.

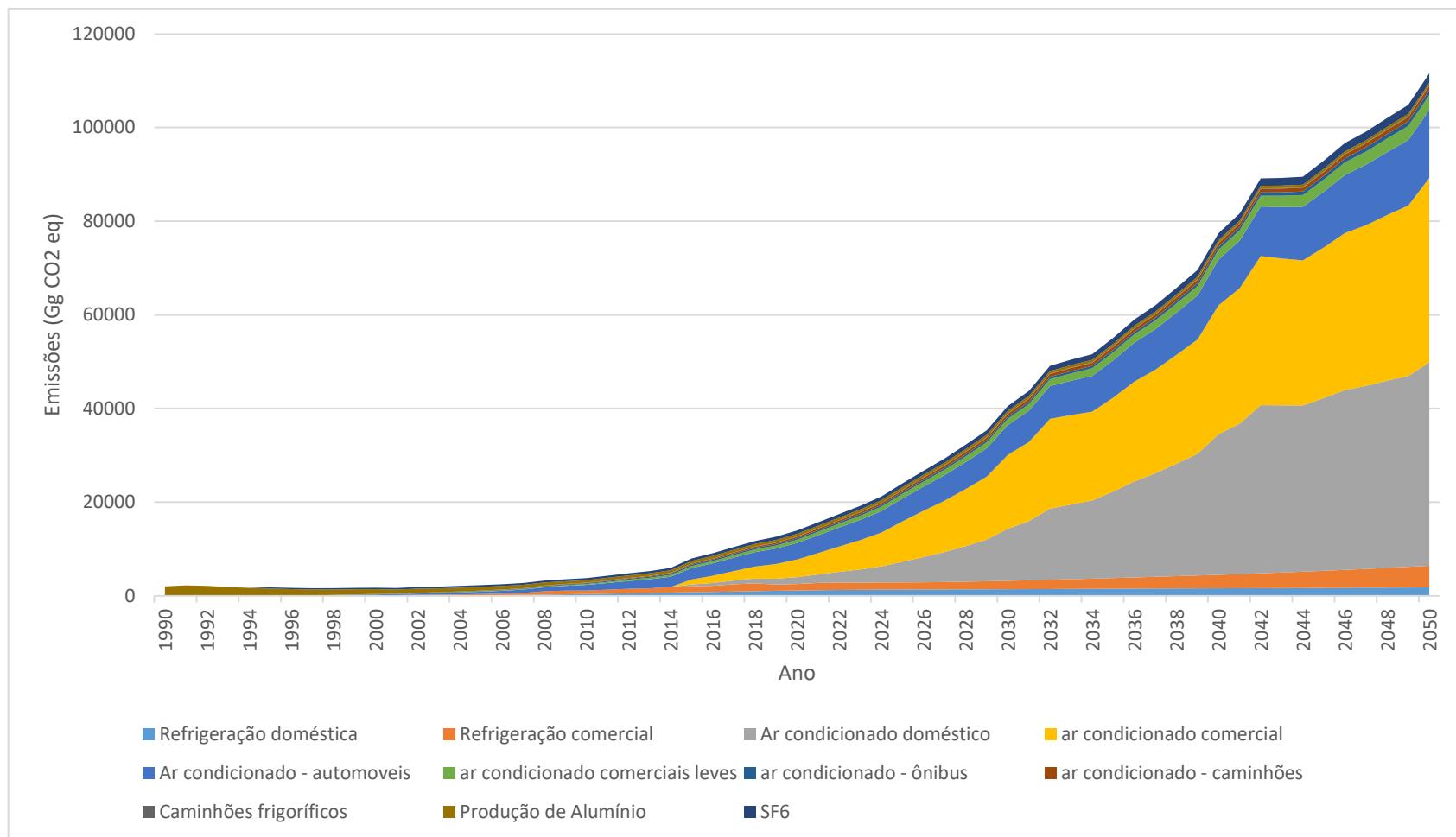
Fonte: Elaboração própria

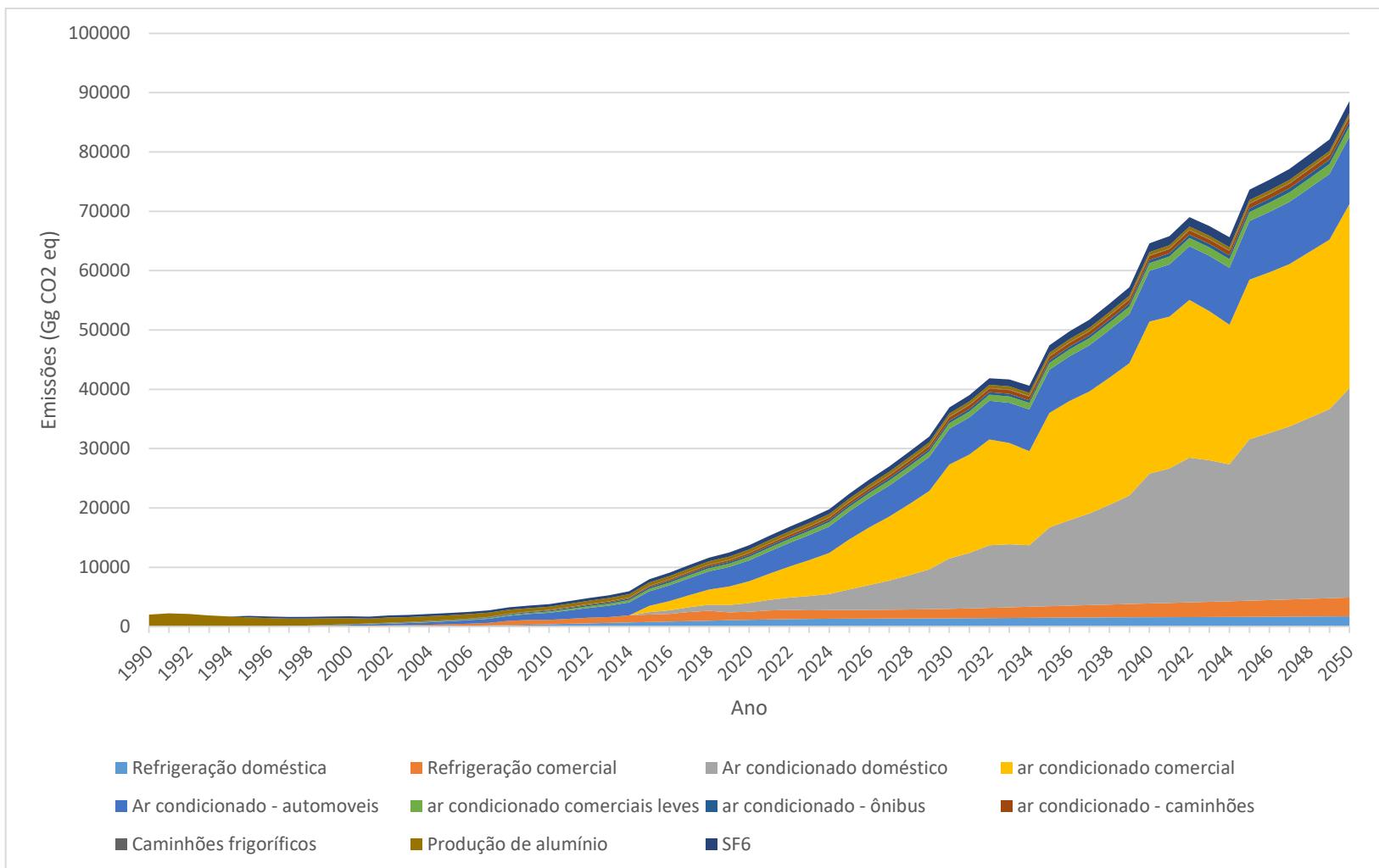
As fugas de SF₆ neste setor cresceram a uma taxa média de 4% ao ano entre 2017 e 2050, totalizando neste último ano, aproximadamente, 2.000GgCO₂eq. Com a implementação do controle de vazamento e do recolhimento ao fim de vida, houve uma redução de 84% nas emissões anuais deste gás fluorado a um custo de 102M€/GgCO₂eq.

Esta medida de mitigação provoca uma drástica redução nas emissões, pois ela reduz tanto a taxa de vazamento por uso, como recolhe o gás que seria emitido ao fim de vida, evitando, assim, boa parte das emissões que aconteceriam.

5.8 Emissões totais de gases fluorados no Brasil até 2050

Nesta seção as emissões de cada um dos grupos de equipamentos analisados neste trabalho são compiladas a fim de ter uma visão completa das fugas de gases fluorados causadores de efeito estufa até 2050. A Figura 95 e a Figura 96 apresentam os resultados do total das emissões destes gases entre 1990 e 2050, destacando-se cada um dos conjuntos de equipamentos para que se possa visualizar a participação deles nas emissões totais.





O total das emissões dos compostos fluorados, no cenário de maior crescimento do PIB, Cenário A, foi de 111.569 Gg CO₂ eq em 2050 e no Cenário B o valor total destas emissões neste mesmo ano foi 21% menor, cerca 88.585 GgCO₂ eq. Tendo em vista estes valores, estima-se que as emissões totais de HFCs, PFCs e SF₆ em 2050 sejam equivalentes a mais de 9 vezes o valor de 2015 no Cenário B e para no cenário de maior crescimento do PIB, as fugas no último ano estudado seriam mais de 12 vezes em relação a aquelas que ocorreram em 2015. Isto representa um crescimento entre 7% e 8% ao ano das emissões de gases fluorados causadores de efeito estufa entre 2015 e 2050.

Em ambos cenários, as fontes que mais contribuíram para as emissões de compostos fluorados no Brasil entre 2015 e 2050, em termos de CO₂eq, foram os equipamentos de ar condicionado comercial com 35% do total das fugas, seguido dos aparelhos de ar condicionado domésticos, 34% e dos aparelhos ar condicionado em automóveis, 15%. Tal resultado converge com o que é esperado para os países em desenvolvimento, onde estas categorias de equipamentos citadas são as principais responsáveis pelas emissões de HFCs em 2050 nestes grupo de nações (PUROHIT & HOGLUND-ISAKSSON 2016).

As descontinuidades, ou seja, os “picos” da Figura 95 e os “vales” da figura 96 são provenientes das emissões por sucateamento dos setores de ar condicionado residencial e comercial. Estes, por sua vez, apresentaram descontinuidades nas emissões ao fim de vida pois tais valores estão correlacionados com valores discretos das séries históricas da produção de seus equipamentos.

A fim de compreender como cada fonte contribui para as emissões destes compostos no Brasil, é apresentada a Figura 97 e a Figura 99, que apresentam o percentual da contribuição das categorias de equipamentos estudadas nas fugas entre 2010 e 2050 nos cenários A e B respectivamente.

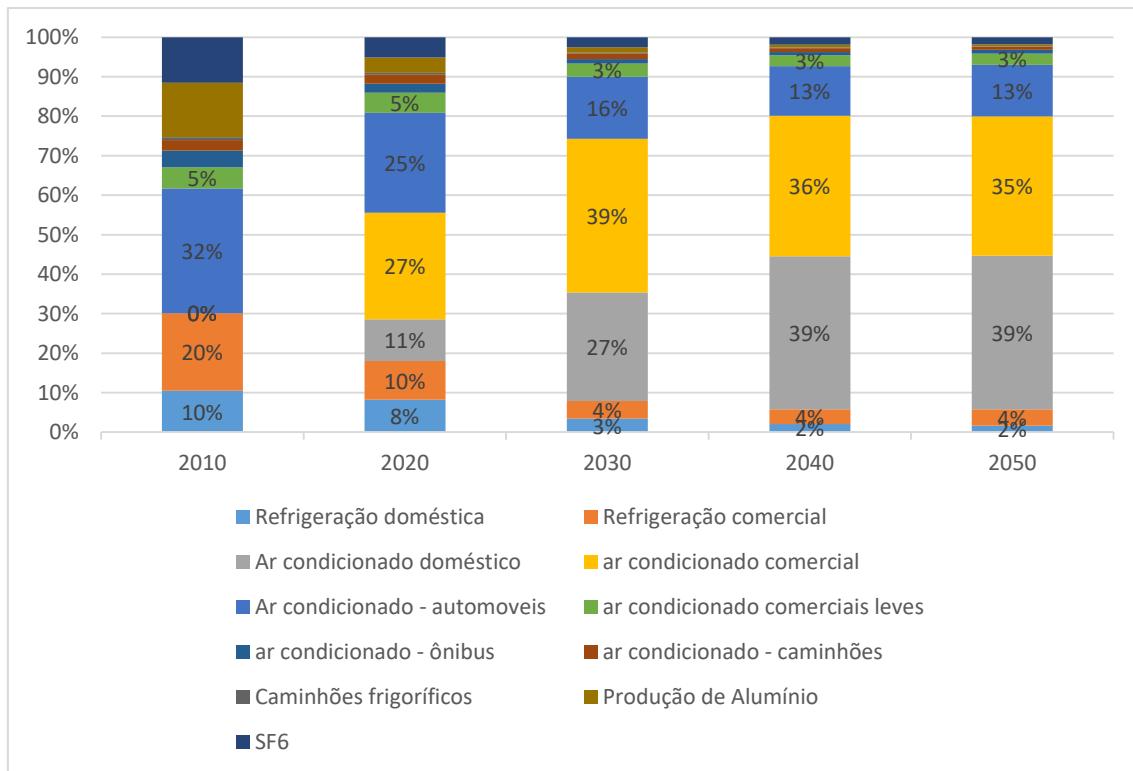


Figura 97. Percentual de emissões de gases fluorados, em termos de CO₂ eq por subsetor entre 2000 e 2050: Cenário A

Fonte: Elaboração própria

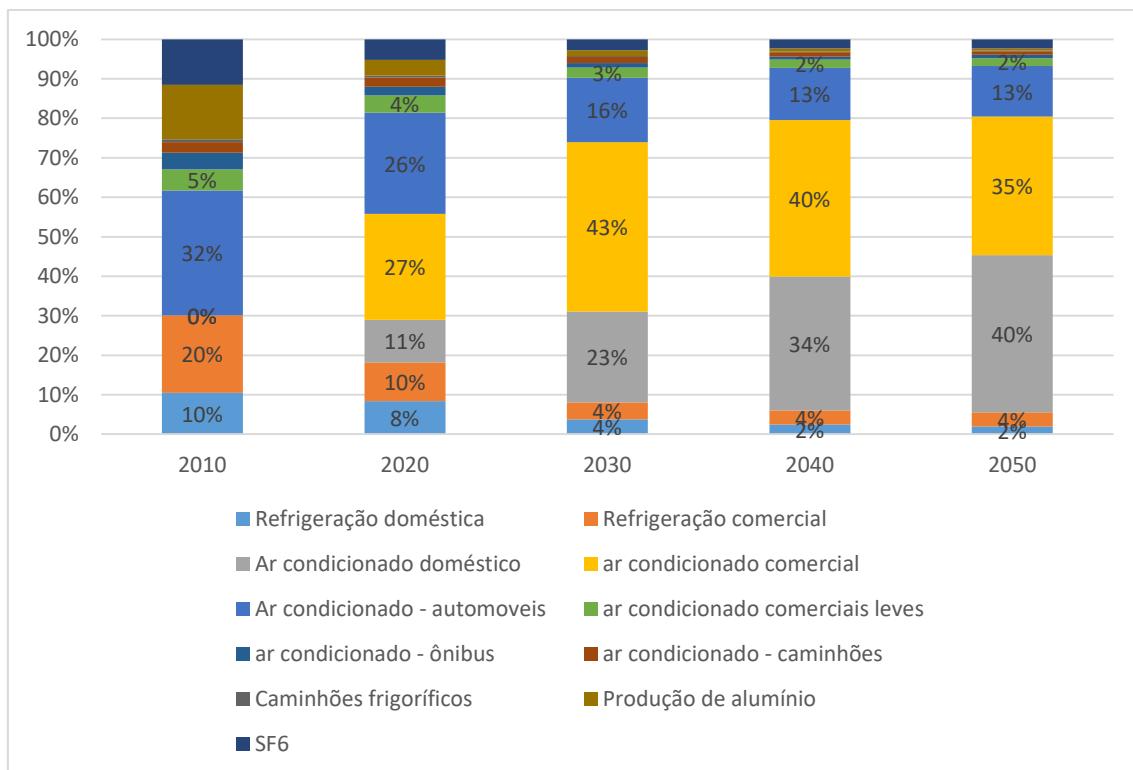
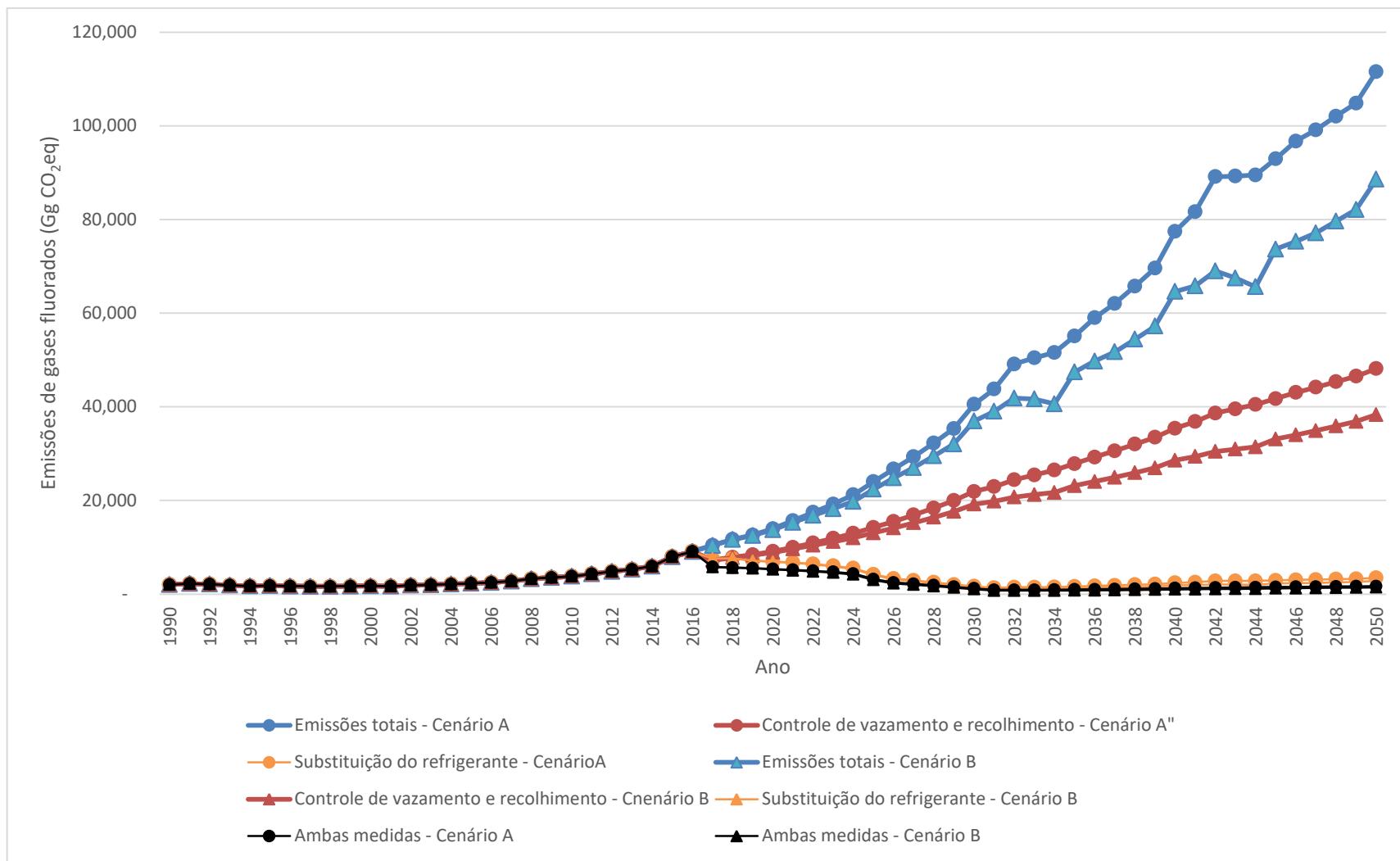


Figura 98. Percentual de emissões de gases fluorados, em termos de CO₂ equivalente por subsetor entre 2000 e 2050: Cenário B

Fonte: Elaboração própria.

Note que já em 2020 a participação das categorias de ar condicionado doméstico e comercial passam de 0% em 2010 para 38% em 2020 nos dois cenários estudados. Isto pode ser explicado por dois fatores, o primeiro é o fato de que nestes grupos não era utilizado HFCs antes de 2015 e não só houve uma rápida transição da utilização destes fluidos nos equipamentos ar condicionado como também há um aumento acelerado da quantidade destes aparelhos no mercado. Em 2030, a participação destes dois grupos somados nas emissões totais ultrapassa os 60%, chegando a 75% em 2050.

Em relação as fugas quando aplicadas medidas de controle, a Figura 99 apresenta as emissões totais de gases fluorados em cada um das categorias de equipamentos nos dois cenários de crescimento de PIB.



Para os dois cenários, a implementação de controle de vazamento e recolhimento ao fim de vida foi capaz de reduzir, aproximadamente, 52% do total das emissões, em termos de CO₂ eq, entre 2017 e 2050. Quando utilizado apenas a substituição do gás fluorado, a redução das fugas foi equivalente a 93%, em termos de CO₂ eq, do total de emissões no mesmo período. A utilização de ambas medidas reduziu aproximadamente 95% do total das emissões, apesar desta ser a maneira de mitigar a maior parte dos gases fluorados emitidos, o incremento dos abatimentos em relação à quando apenas a substituição é aplicada, foi de apenas 2% do total de emissões de gases fluorados entre 2017 e 2050.

Implementada a substituição dos refrigerantes a partir de 2017, as emissões de gases fluorados, em CO₂eq, não ultrapassam o nível de 10.000Gg de CO₂eq em nenhum momento. Além disso, com esta medida em ambos cenários, as emissões são inferiores a 5.000 Gg de CO₂eq. A Tabela 40 apresenta as emissões brasileiras de gases fluorados, em Mt CO₂eq, no ano de 2050, para cada um dos cenários desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 40. Emissões brasileiras de gases de efeito estufa e gases fluorados de efeito estufa em 2050

Cenário	Emissões em 2050 (Mt CO₂ eq)
Cenário A – Sem controle	
Gases fluorados	112
Cenário B – Sem controle	
Gases fluorados	89
Cenário A – Controle de vazamento e recolhimento	
Gases fluorados	47
Cenário B – Controle de vazamento e recolhimento	
Gases fluorados	38
Cenário A – Substituição do refrigerante	
Gases fluorados	4
Cenário B – Substituição do refrigerante	
Gases fluorados	3
Cenário A – Ambas medidas	
Gases fluorados	2
Cenário B – Ambas medidas	
Gases fluorados	1

Fonte: Elaboração própria

Para melhor compreender a relevância das projeções aqui desenvolvidas, confrontam-se os resultados obtidos com o estudo de KITOUS & KERAMIDAS (2016), previamente citado na introdução deste trabalho. No *Reference Scenario* de KITOUS & KERAMIDAS (2016), a emissão total de gases de efeito estufa em 2050 são de 1.393 Mt de CO₂ eq, já as fugas totais de gases fluorados de efeito estufa estimadas aqui neste mesmo ano, representam cerca de 6,3% a 8,0% destas emissões totais, valor que em 2010 equivalia a menos de 1% (MCTI 2016a) e 11,5% a 14,4% das emissões dos setores de energia e industrial.

Já no cenário relacionado com a INDC brasileira os autores calculam que o total de emissões no Brasil deverá ser de 1.196 Mt CO₂ eq e as emissões dos setores de energia e indústria, 736 Mt CO₂ eq. Conforme foi estimado neste trabalho, caso não haja nenhuma política brasileira para mitigar as emissões destes gases fluorados, as fugas destes compostos equivaleriam a 7,4% a 9,4% do total e 12,1% a 15,2% das emissões do setor de energia e indústria. Note que neste cenário, de acordo com KITOUS & KERAMIDAS (2016), as emissões brasileiras de gases fluorados devem ser iguais a 7 Mt CO₂eq, 6-8% da quantidade que deverá ser emitida destes compostos caso não haja nenhuma medida de mitigação. A implementação do controle de vazamento e o recolhimento ao fim de vida no “Cenário A” atingiu o valor, em 2050, de 47 Mt CO₂eq e 38 Mt CO₂eq no “Cenário B”, da forma que com esta medida não seria possível alcançar o nível das emissões apresentadas no *INDCs Scenario*. Já com a substituição do fluido refrigerante seria possível atingir este resultado, pois as emissões de gases fluorados com esta medida de mitigação em 2050 ficam entre 3 e 4 Mt CO₂eq, nos cenários B e A, respectivamente.

Em 2°C *Scenario*, os autores estimam as emissões totais de gases de efeito estufa de 218 Mt CO₂eq em 2050. Este valor chama a atenção, pois caso haja um descaso com a mitigação de gases fluorados no Brasil, estes compostos podem representar entre 41% a 51% das fugas totais de gases de efeito estufa no ano de 2050. Note também, que para se enquadrar neste cenário de KITOUS & KERAMIDAS (2016), seria necessário que as emissões de gases fluorados não ultrapassem 6 Mt CO₂eq, da forma que, da mesma maneira que no *INDCs Scenario*, apenas o controle de vazamento e recolhimento ao fim de vida não seria o suficiente para reduzir as emissões tais níveis, apenas se introduzida a substituição do composto fluorado, as fugas estariam abaixo de tal valor.

As Figura 100 e Figura 101 apresentam os resultados as curvas custo de abatimento de gases fluorados para o “Cenário A” e a Figura 102 e a Figura 103, para o “Cenário B”.

Em ambos os cenários, com um custo de mitigação inferior a 0 M€/GgCO₂eq, é possível abater boa parte das emissões de gases fluorados em 2050, através da substituição do refrigerante nos equipamentos de ar condicionado domésticos, cerca de 37% do total de emissões neste mesmo ano. Até 5 M€/GgCO₂eq é possível abater as emissões provenientes as emissões dos equipamentos de ar condicionado comerciais pela da substituição do refrigerante e as emissões da refrigeração doméstica através do recolhimento ao fim de vida. Somada estas duas medidas a primeira, é possível abater mais de 70% do total das emissões em 2050.

Note que todas as medidas que se referem a substituição apresentam custos marginais de mitigação inferiores a 20 M€/GgCO₂eq e podem reduzir 97% das emissões em 2050, em termos de CO₂eq. Já a implementação do controle de vazamento e recolhimento ao fim de vida, só possui custo abaixo deste citado quando referente aos equipamentos de refrigeração doméstica, sendo que a maioria do potencial de redução utilizando esta medida é encontrada a custos superiores a 40 M€/GgCO₂eq. Além disto, mesmo se tal opção de controle fosse utilizada em todas as medidas, a quantidade abatida ainda seria razoavelmente inferior da substituição, apenas 57% do total das emissões neste último ano.

Curva de abatimento em 2050 - Substituição dos gases fluorados - Cenário A

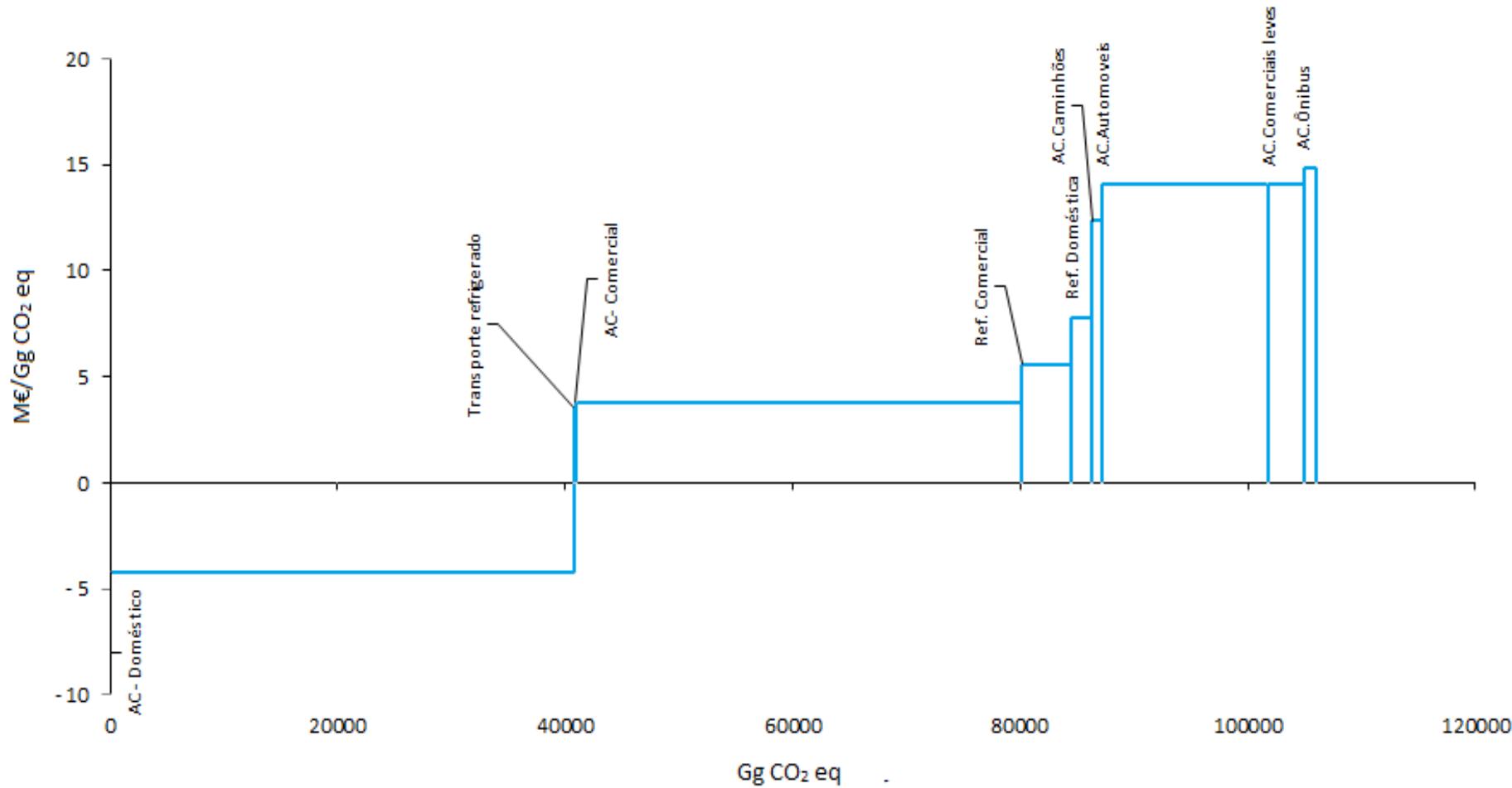


Figura 100. Curva de abatimento das tecnologias de substituição dos gases fluorados em 2050 (Cenário A)

Fonte: Elaboração própria

Curva de abatimento em 2050 - controle de vazamento e recolhimento- Gases fluorados - Cenário A

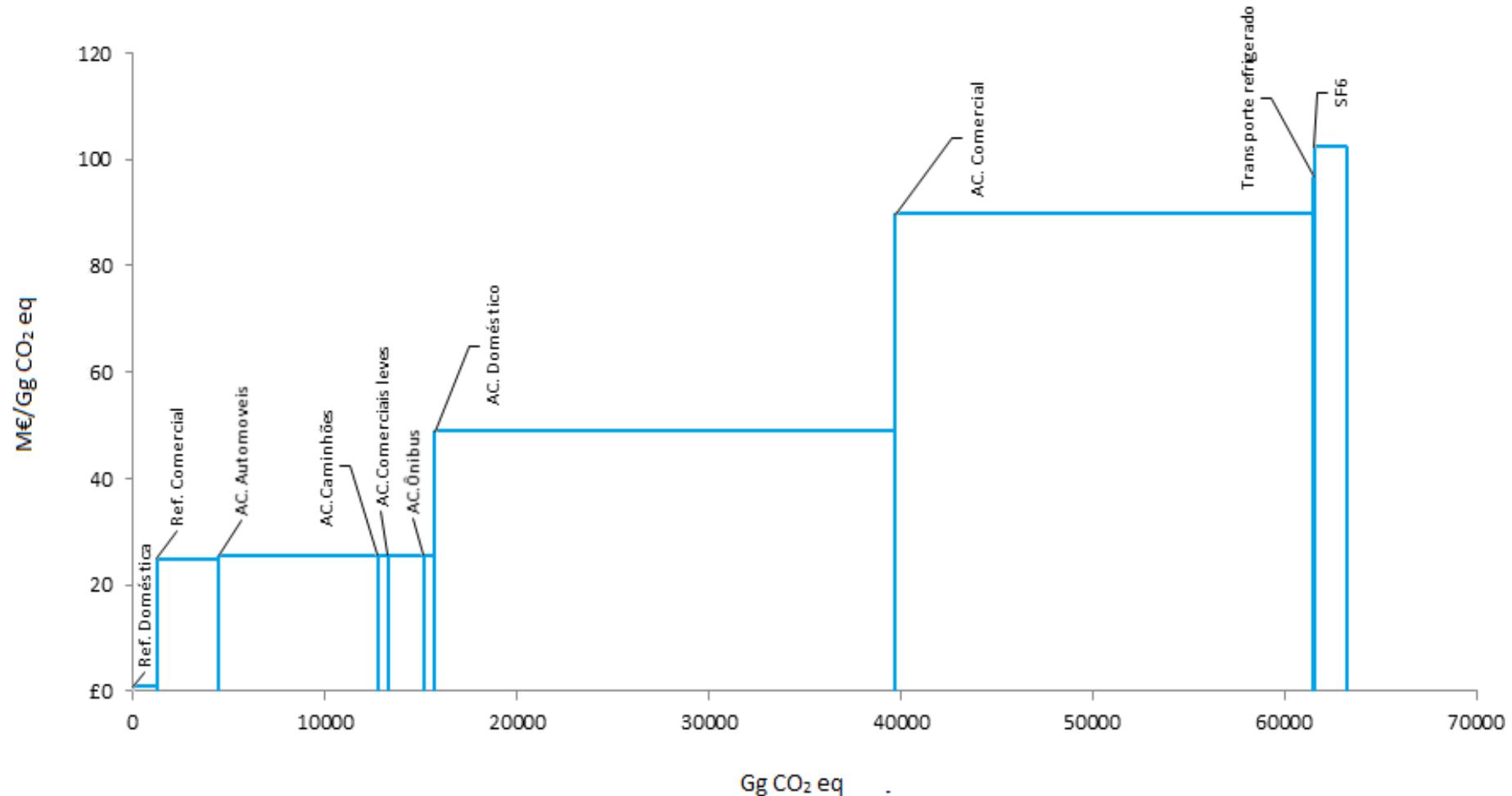


Figura 101. Curva de abatimento das tecnologias de controle de vazamento e recolhimento em 2050 (Cenário A)

Fonte: Elaboração própria

Curva de abatimento em 2050 - Substituição dos gases fluorados - Cenário B

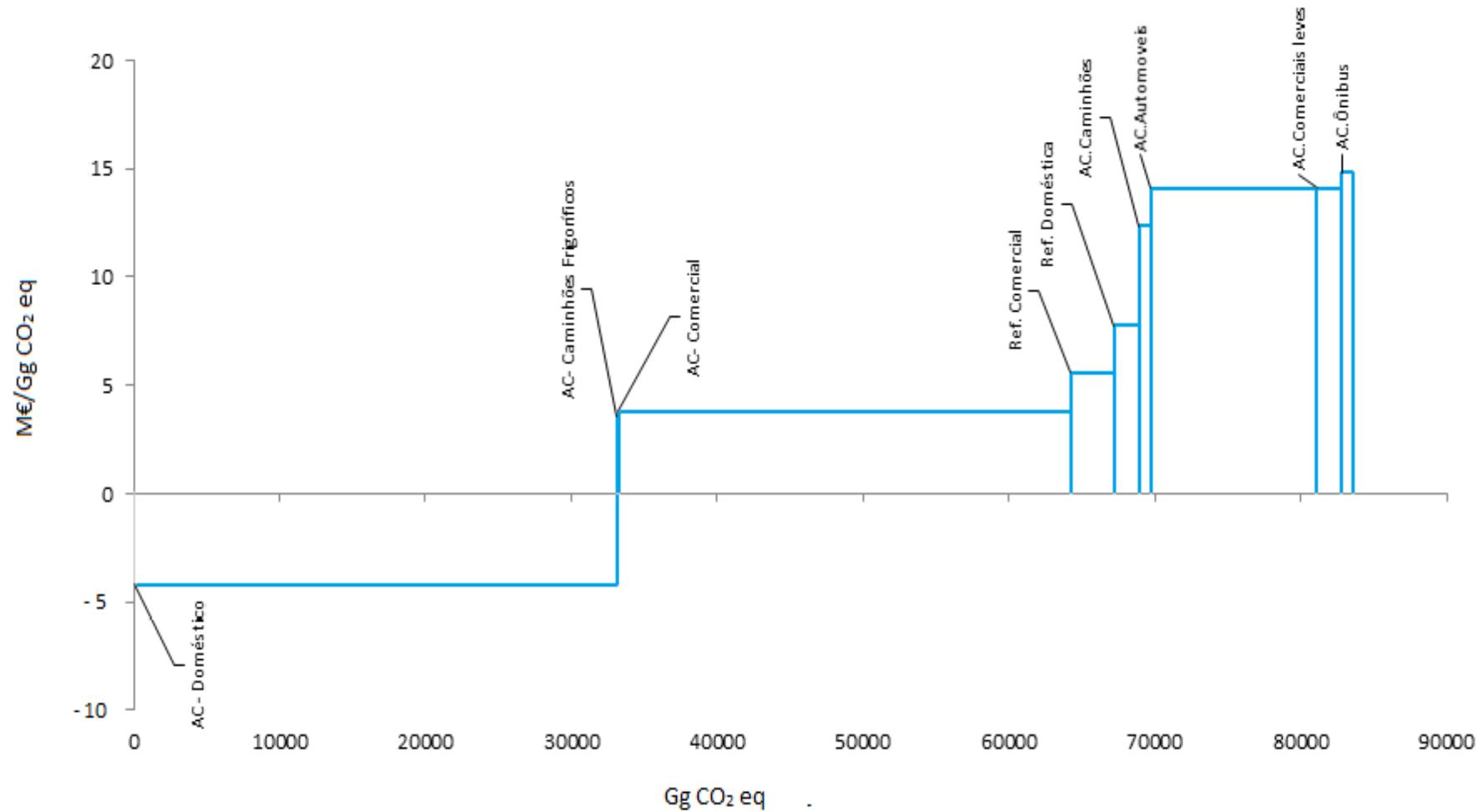


Figura 102. Curva de abatimento das tecnologias da substituição de gases fluorados em 2050 (Cenário B)

Fonte: Elaboração própria

Curva de abatimento em 2050 - controle de vazamento e recolhimento- Gases fluorados - Cenário B

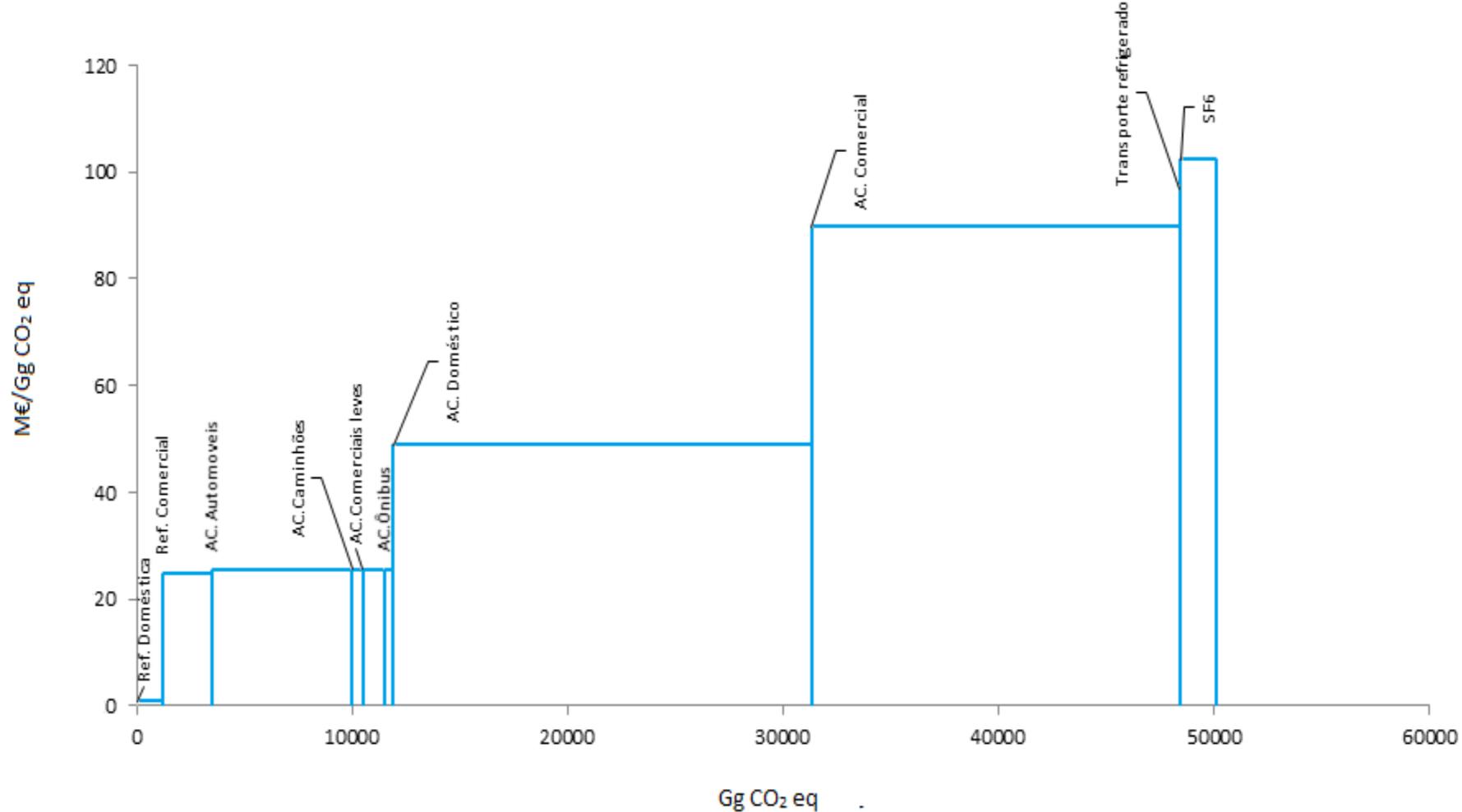


Figura 103. Curva de abatimento das tecnologias de controle e vazamento em 2050 (Cenário B)

Fonte: elaboração própria

6. Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo a projeção até o ano 2050 das emissões brasileiras de gases fluorados causadores de efeito estufa (HFC, PFC e SF₆) provenientes de suas principais fontes (sistemas de refrigeração e ar condicionado, produção de alumínio, equipamentos de distribuição e transmissão de energia elétrica), como também o potencial e os custos de mitigação destas fugas quando implementadas medidas de controle.

Como fora apresentado, devido à tendência de crescimento econômico e populacional, pode-se concluir que a demanda por equipamentos que consomem fluidos fluorados deve aumentar até o horizonte do trabalho, principalmente no que diz respeito aos aparelhos de ar condicionado, como também o aumento da participação dos refrigerantes fluorados nos mesmos.

Embora as emissões brasileiras destes compostos causadores de efeito estufa sejam relativamente baixas, menos de 1% (aproximadamente 8.000 Gg CO₂eq dos 1.271.000 Gg CO₂eq) do total das emissões brasileiras em 2010 (MCTI 2016), esta dissertação mostra que tal parcela poderá crescer drasticamente chegando a 89.000 Gg CO₂eq, em um cenário cujo o PIB aumenta de forma mais comedida, Cenário B, até 112.000 Gg CO₂eq, caso PIB cresca de forma mais acelerada, o que representaria um crescimento de 1.112% a 1.400% quando comparado com os valores atuais.

Destaca-se a contribuição dos equipamentos de ar condicionado, em especial aqueles estacionários, como os principais contribuidores das emissões de gases fluorados causadores de efeito estufa. Nulas em 2010, as fugas de aparelhos de condicionamento de ar utilizados em residências e estabelecimentos comerciais, em 2050 foram responsáveis por 75% das emissões de gases fluorados, se acrescida a contribuição de ar condicionados veiculares, estas chegam a 88%.

A implementação de medidas de controle são fundamentais para que estes níveis de emissões supracitados não sejam alcançados. Quando introduzida o controle de vazamento e o recolhimento ao fim de vida, medidas cujo custo de abatimento varia, majoritariamente, entre 20 M€/GgCO₂eq e 120 M€/GgCO₂eq , 52%, em média, de todas as emissões podem ser abatidas em ambos os cenários de crescimento do PIB. A substituição do fluido, entretanto, apresentou um alcance maior: 92% das fugas de gases

fluorados poderão ser reduzidas, em termos de CO₂eq, se tal medida for utilizada e a custos inferiores a 20M€/GgCO₂eq. Por fim, quando usadas todas as opções de mitigação citadas, é possível abater 95% do total das emissões, embora seja o maior potencial de redução de emissões, o incremento em relação a apenas a substituição do fluido é baixo.

A fim de se evitar o aumento da temperatura do planeta devido emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (IPCC 2014), a mitigação das fugas de compostos fluorados se torna uma obrigação não apenas pela necessidade de redução das emissões, mas também pela prevenção do crescimento das fugas em setores que hoje são insignificantes.

Por fim, este trabalho poderá contribuir para que o Brasil desenvolva políticas de mitigação de gases fluorados em congruência com as futuras restrições que deverão ser adotadas com a introdução do Acordo de Kigali, assinado pelos países que compõem o Protocolo de Montreal, que visa a redução do consumo e produção de gases fluorados causadores de efeito estufa.

Para os trabalhos futuros, pode-se citar algumas sugestões:

- Maior detalhamento a respeito dos custos das medidas de mitigação, a fim de tornar tais valores mais harmônicos com a realidade brasileira, dado que os custos utilizados neste trabalho são provenientes da literatura científica e referentes ao continente europeu;
- Avaliar a implementação das medidas de controle através de uma análise de sensibilidade de seus custos;
- Avaliar a evolução dos custos da medida de mitigação ao longo do tempo, tendo em vista que estes podem se tornar mais baratos com os avanços tecnológicos e a aprendizagem;
- Elaborar as categorias de ar condicionado e refrigeração comercial de forma mais detalhada no que diz respeito aos equipamentos utilizados, dado que estas categorias possuem uma pluralidade de aparelhos;
- Avaliar as barreiras técnicas a serem ultrapassadas em relação a implementação dos possíveis refrigerantes fluorados, tal qual a utilização de refrigerantes inflamáveis;

- Avaliar em termos de ciclo de vida o balanço de emissões relativas à substituição dos refrigerantes fluorados por aqueles de menor GWP;
- Avaliar a influência da substituição dos refrigerantes fluorados por aqueles de menor GWP sobre o consumo de energia.

Referências Bibliográficas

- DE AGUIAR PEIXOTO, R. ET AL., 2005. Chapter 5: Residential and Commercial Air Conditioning and Heating. *IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System*, pp.269–294.
- ANFAVEA, 2016. *Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira 2016*, São Paulo, Brasil.
- BEU, L., 2005. *Reduction of Perfluorocompound (PFC) Emissions: 2005 State-of-the-Technology Report*. International SEMATECH Manufacturing Initiative (ISMI).
- BEZERRA, P. ET AL., 2017. The power of light: socio-economic and environmental implications of a rural electrification program in Brazil. *Environ. Res. Lett.*, *at press*: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7bdd>.
- BRADESCO, 2016. *Projeções Bradesco Longo Prazo*. Banco Bradesco, Brasil.
- CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2016. *Documentation of California's Greenhouse Gas Inventory*. CEPA, California, Estados Unidos.
- CARDOSO, J.G.D.R. ET AL., 2010. A indústria do alumínio: estrutura e tendências. *Insumos Básicos*, pp.43–88.
- CARDOSO, R.B. & NOGUEIRA, L.A.H., 2007. Estimativa do consumo de energia elétrica em refrigeradores no setor residencial brasileiro. *Revista Brasileira de Energia*, 13(2), pp.55–67.
- CEPA, 2016. *California's 2000-2014 Greenhouse Gas Emission Inventory - Technical Support Document*. CEPA, California, Estados Unidos.
- CHATURVEDI, V. ET AL., 2015. India's long term hydrofluorcarbon emissions. *CEEW-IIASA* 53(9), pp.1689-1699.
- COMISSÃO EUROPEIA, 2006a. DIRETIVA 2006/40/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. *Jornal Oficial da União Europeia*. Bruxelas, Bélgica.
- COMISSÃO EUROPEIA, 2006b. REGULAMENTO (CE) N.o 842/2006 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. *Jornal Oficial da União Europeia*. Bruxelas, Bélgica.
- COMISSÃO EUROPEIA, 2014. REGULAMENTO (UE) N. o 517/2014 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 16 de abril de 2014 relativo

aos gases fluorados com efeito de estufa e que revoga o Regulamento (CE) n.º 842/2006. *Jornal Oficial da União Europeia*. Bruxelas, Bélgica.

DAVENPORT, C., 2016. Nations, Fighting Powerful Refrigerant That Warms Planet, Reach Landmark Deal. *New York Times*. Nova Iorque, Estados Unidos.

DINÇER, I. & KANOGLU, M., 2010. *Refrigeration Systems and Applications* 2nd edition., John Wiley & Sons, Ltd.

EEA, 2014a. *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2012 and inventory report*. EEA, European Union.

EEA, 2014b. *Fluorinated greenhouse gases 2013: Aggregated data reported by companies on the production, import and export of fluorinated greenhouse gases in the European Union*. EEA, European Union.

ELETROBRAS/PROCEL, 2007. *AVALIAÇÃO DO MERCADO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL - PESQUISA DE POSSE EQUIPAMENTOS E HÁBITOS DE USO*, Rio de Janeiro, Brasil.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016. *Demanda de Energia 2050*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, Brasil.

EPE, 2015a. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, Brasil.

EPE, 2006. *Consumo Final e Conservação de Energia Elétrica*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, Brasil.

EPE, 2015b. *Nota Técnica DEA XX/15 - Cenário econômico 2050*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, Brasil.

FARMAN, J.C., GARDINER, B.G. & SHANKLIN, J.D., 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 315(6016), pp.207–210.

FMI, 2016. World Economic Outlook Database. Fundo Monetário Internacional (FMI).

GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY, 2011a. *Avoiding Fluorinated Greenhouse Gases*. German Federal Environment Agency. Alemanha.

GERMAN FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY, 2011b. *Avoiding Fluorinated Greenhouse Gases: Prospects for Phasing Out*. German Federal Environment Agency. Alemanha.

- GRAGE, T. & PAREIDT, H., 2000. *Innovative Kälteversorgung öffentlich genutzter Gebäude in Niedersachsen Strategien der Kältebereitstellung unter ökologischen und ökonomischen Kriterien*. Alemania.
- GSCHREY, B. ET AL., 2011. High increase of global F-gas emissions until 2050. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1(March 2015), pp.85–92.
- GSCHREY, B. & SCHWARZ, W., 2009. Projections of global emissions of fluorinated greenhouse gases in 2050. *Climate Change - Umweltbundesamt*, 17, p.43.
- HARNISCH, J. & HENDRIKS, C., 2000. Economic Evaluation of Emission Reductions of HFCs, PFCs and SF₆ in Europe.
- HARNISCH, J. & SCHWARZ, W., 2003. Costs and the impact on emissions of potential regulatory framework for reducing emissions of hydrofluorocarbons, perfluorocarbons and sulphur hexafluoride.
- HÖGLUND-ISAKSSON, L. ET AL., 2012. EU low carbon roadmap 2050: Potentials and costs for mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions. *Energy Strategy Reviews*, 1(2), pp.97–108.
- HÖGLUND-ISAKSSON, L., WINIWARTER, W. & PUROHIT, P., 2013. Non-CO₂ greenhouse gas emissions, mitigation potentials and costs in the EU-28 from 2005 to 2050. GAINS model methodology. IIASA Report. IIASA, Laxenburg, Austria.
- IBGE, 2002. *Censo Demográfico de 2000*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 2016a. *Contas Nacionais Trimestrais*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 2017. *Indicadores Sociais Mínimos - Conceitos*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 1998. *Pesquisa Industrial Anual*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 2014. *Pesquisa Industrial Anual - Produto*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 2016b. *Pesquisa Mensal de Emprego - Notas Metodológicas*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 2005. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 1995. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 2012. *Pesquisa Nacional Por Amostra de Domicílios - Síntese de Indicadores 2011*. IBGE, Brasil.
- IBGE, 2013. *Projeção da População do Brasil por sexo e idade: 2000-2060*. IBGE,

Brasil.

IBGE, 2016c. *Séries Históricas e Estatísticas*. IBGE, Brasil.

IBGE, 2016d. *Sistema de Contas Nacionais Trimestrais*. IBGE, Brasil.

IDDRI, 2015. *Beyond the Numbers : Understanding the Transformation Induced by INDCs*, Paris, France.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2008. *Projeção da população do Brasil por sexo e idade 1980-2050: Revisão 2008*. IBGE, Brasil.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Japan.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.

IPCC, 2000. INDUSTRIAL PROCESSES. In *IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.

IPCC/TEAP, 2005. *Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System*. Chapter 4: Refrigeration, pp.227–261.

KITOUS, A. & KERAMIDAS, K., 2016. *GECO 2016 GHG and Energy Balances*.

LOVELOCK, J.E., 1971. *Atmospheric Fluorine Compounds as Indicators of Air Movements*. JRC Technical Reports, European Union.

MACHADO, B.V.Z., 2016. *Perspectivas para uma política brasileira de eficiência energética veicular*. Dissertação de M.Sc. - Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPE/COPPE/UFRJ).

MCNEIL, M.A. ET AL., 2013. Bottom-Up Energy Analysis System (BUENAS)-an international appliance efficiency policy tool. *Energy Efficiency*, 6(2), pp.191–217.

MCNEIL, M.A. & LETSCHERT, V.E., 2010. Modeling diffusion of electrical appliances in the residential sector. *Energy and Buildings*, 42(6), pp.783–790.

MCNEIL, M.A., LETSCHERT, V.E. & DE LA RUE DU CAN, S., 2008. *Global Potential of Energy Efficiency Standards and Labeling Programs*.

MCTI, 2016. *3^a COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA*. Brasil.

MCTI, 2015a. *EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS: Emissões na produção e no consumo de HFCs e SF6*. Brasil.

MCTI, 2014. *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. Segunda edição*, Brasilia: Ministério da Ciencia, Tecnologia e Inovacao (MCTI).

MCTI, 2010. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, pp.1–280.

MCTI, 2015b. *TERCEIRA COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA*. Brasil.

MCTI, 2015c. *TERCEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA - RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA: SETOR PROCESSOS INDUSTRIAIS, PRODUÇÃO DE METAIS*. Brasil.

MDIC, 2017. AliceWeb.

MEHTA, V.K. & MEHTA, R., 2008. *Principle of Electronics*, S Chand.

MMA, 2014. *Ações brasileiras para a proteção da camada de ozônio*, Brasilia, Brasil.

MMA, 2017. iNDC (Contribuição Nacionalmente Determinada). Brasilia, Brasil.

MMA, 2016a. Plano Nacional de Eliminação de CFCs - Conversão Tecnológica. Brasilia, Brasil.

MMA, 2016b. Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs. Brasilia, Brasil.

MMA, 2016c. Proteção da Camada de Ozônio. Brasilia, Brasil.

MME, 2017. Programa Luz para Todos. Brasilia, Brasil.

MOLINA, M.J. & ROWLAND, F.S., 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atomc-atalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, pp.810–812.

MOTA-BABILONI, A. ET AL., 2015. Commercial refrigeration – An overview of current status. *International Journal of Refrigeration*, 57, pp.225–268.

MYHRE, G. ET AL., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate*

Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of, pp.1–44.

MYHRE, G. ET AL., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing: In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, pp.659–740.

NOBEL MEDIA AB, 2014. The Nobel Prize in Chemistry 1995.

NOGUEIRA, L.A.H. ET AL., 2015. Evaluation of the energy impacts of the Energy Efficiency Law in Brazil. *Energy for Sustainable Development*, 24, pp.58–69.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2014. World Urbanization Prospects, the 2014 revision.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO - OIT, 2011. Economically Active Population, Estimates and Projections.

OZONE SECRETARIAT, 2016. The Kigali Amendment (2016): The amendment to the Montreal Protocol agreed by the Twenty-Eighth Meeting of the Parties (Kigali, 10-15 October 2016).

PARSON, E.A., 2003. *Protecting the Ozone Layer*, Oxford University Press.

PEIXOTO, R. ET AL., 1993. A Substituição dos CFCs e HCFCs e a Indústria de Refrigeração. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2014. Prefeitura mantém meta para que todos os ônibus da cidade tenham ar-condicionado até 2016. Rio de Janeiro, Brasil.

PUROHIT, P. ET AL., 2016. Scenario Analysis for HFC Emissions in India : Mitigation potential and costs.

PUROHIT, P. & HOGLUND-ISAKSSON, L., 2016. Global emissions of fluorinated greenhouse gases until 2050 : Technical mitigation potentials & costs Results & Discussions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, p.2361.

PUROHIT, P. & HÖGLUND-ISAKSSON, L., 2016. *Supplementary material to : Global*

emissions of fluorinated greenhouse gases 2005-2050 with abatement potentials and costs.

RAVISHANKARA, A.R. ET AL., 1994. Do hydrofluorocarbons destroy stratospheric ozone? *Science (New York, N.Y.)*, 263(5143), pp.71–5.

SCHAEFFER, R. & SZKLO, A., 2008. *Estudo sobre as ameaças e as oportunidades relativas ao problema das mudanças climáticas globais sobre o setor de petróleo e gás e proposição de ações por parte da Petrobras para lidar com o risco carbono*, Rio de Janeiro, Brasil.

SCHWARZ, W., 2011. Preparatory study for a review of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases.

SCHWARZ, W. ET AL., 2011. *Preparatory study for a review of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases: Annexes to the Final Report*.

TEAP, 2012. *Decision XXIII/0 Task Force Report: Additional Information on Alternatives to Ozone-Depleting Substance*.

TOLLEFSON, J., 2016. Nations agree to ban refrigerants that worsen climate change. *Nature*.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2015. *Aluminum*. Mineral Commodity Summaries. United States.

UN, 1998. Kyoto Protocol To the United Nations Framework Kyoto Protocol To the United Nations Framework. *Review of European Community and International Environmental Law*, 7, pp.214–217.

UNEP, 2016a. Frequently asked questions relating to the Kigali Amendment to the Montreal Protocol (November), pp.1–3.

UNEP, 2016b. Handbook for The Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. United Nations Environmental Programme (UNEP).

UNEP, 2011. *HFCs: A Critical Link in Protecting Climate and the Ozone Layer*. United Nations Environmental Programme (UNEP).

UNEP, 2007. *Report of the Nineteenth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. United Nations Environmental Programme (UNEP).

- USEPA, 2016a. *Electric Power Systems Partnership*. USEPA, United States.
- USEPA, 2012. *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990 - 2030*. USEPA, United States.
- USEPA, 2013. *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 2010-2030*. USEPA, United States.
- USEPA, 2016b. *SNAP Regulations*. USEPA, United States.
- USEPA, 2004. *The Clean Air Act*. USEPA, United States.
- USEPA, 2010. *Transitioning to low - GWP alternatives in commercial refrigeration*. USEPA, United States.
- VELDERS, G.J.M. ET AL., 2015. Future atmospheric abundances and climate forcings from scenarios of global and regional hydrofluorocarbon (HFC) emissions. *Atmospheric Environment*, 123, pp.200–209.
- VELDERS, G.J.M. ET AL., 2009. The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(27), pp.10949–10954.
- WELCH, C. & ROGERS, B., 2010. Estimating the Remaining Useful Life of Residential Appliances. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, p.12.
- WMO, 2011. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010*, Geneva, Suíça.
- WORLD LCD INDUSTRY COOPERATION COMMITTEE, 2011. *WLICC WG1 Activity Report on the 2010 FCs Emissions Reduction*, Tokyo, Japan.
- WSC, 2015. Environment Safety and Health.

Anexo I

A seguir são apresentados os custos marginais de mitigação, calculados pela Equação 4-5 e Equação 4-6, de todas as opções de refrigerantes substitutos a aqueles fluorados causadores de efeito estufa nas diversas categorias de equipamentos estudados neste trabalho.

Tabela 41. Custos de mitigação das diversas opções de refrigerante a substituir os causadores de efeito estufa e seus custos marginais de mitigação

Categoria de equipamento	Refrigerante substituto	Custo de mitigação (M€/GgCO₂eq)
Refrigeração doméstica (geladeiras e freezers)	Isobutano	7,78
	Hidrocarboneto alternativo	119,30
Refrigeração comercial	CO ₂	98,94
	HFC-152	5,61
	Hidrocarboneto alternativo	-2,40
Ar condicionado residencial	CO ₂	36,93
	HFC-152	-4,21
	HFC-1234yf	16,59
	Hidrocarboneto alternativo	3,79
	CO ₂	18,92
Ar condicionado comercial	HFC-152	23,33
	HFC-1234yf	29,84
Ar condicionado veicular: automóveis	CO ₂	24,17
	HFC-1234yf	14,10
Ar condicionado veicular: comerciais leves	CO ₂	24,17
	HFC-1234yf	14,10
Ar condicionado veicular:	CO ₂	12,37

caminhões	HFC-1234yf	15,55
	Hidrocarboneto alternativo	3,63
Ar condicionado veicular:		
caminhões	CO ₂	5,54
	HFC-152	3,55
Ar condicionado veicular:		
ônibus	CO ₂	25,91
	HFC-1234yf	14,83

Fonte: Elaboração própria