



*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*



MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE EDIFICAÇÕES

RÉGIS RATHMANN
(ORGANIZADOR)

***MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES
DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR
DE EDIFICAÇÕES***

Brasília
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
ONU Meio Ambiente
2017

M689 Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de edificações/
organizador Régis Rathmann. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações
e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017.

308 p.: il. – (Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em
setores-chave do Brasil)

ISBN: 978-85-88063-40-2

1. Mudanças Climáticas. 2. Emissão de gases. 3. Edificações. 4. Políticas públicas –
Emissão de gases. I. Rathmann, Régis. II. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e
Comunicações. III. ONU Meio Ambiente. IV. Série.

CDU 551.583

Ficha catalográfica elaborada por: Lorena Nelza F. Silva – CRB-1/2474

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e
Comunicações
Esplanada dos Ministérios, Bloco E
CEP: 70.067-900 – Brasília – DF
Tel.: +55 (61) 2033-7500
www.mcti.gov.br

ONU Meio Ambiente – Programa das Nações Unidas
para o Meio Ambiente
Casa da ONU – Complexo Sérgio Vieira de Mello
Setor de Embaixadas Norte, Quadra 802, Conjunto C,
Lote 17
CEP 70800-400 – Brasília/DF
Tel.: +55 (61) 3038-9233
web.unep.org/regions/brazil

República Federativa do Brasil

Presidente da República

Michel Temer

**Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia,
Inovações e Comunicações**

Gilberto Kassab

Secretário Executivo

Elton Santa Fé Zacarias

**Secretário de Políticas e Programas de Pesquisa
e Desenvolvimento**

Jailson Bittencourt de Andrade

**Diretor do Departamento de Políticas e
Programas de Ciências**

Sávio Túlio Oselieri Raeder

Coordenador-Geral do Clima

Márcio Rojas da Cruz

**Programa das Nações Unidas para o Meio
Ambiente – ONU Meio Ambiente**

Diretor Executivo da ONU Meio Ambiente

Erik Solheim

**Diretor Regional da ONU Meio Ambiente
para América Latina e Caribe**

Leo Heileman

**Representante da ONU Meio Ambiente
no Brasil**

Denise Hamú

EQUIPE TÉCNICA DO MCTIC

Coordenador-Geral do Clima

Márcio Rojas da Cruz

**Diretor Nacional do Projeto Opções de
Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa
em Setores-Chave do Brasil**

Ricardo Vieira Araújo

**Coordenador do Projeto Opções de Mitigação
de Emissões de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil**

Antônio Marcos Mendonça

**Coordenador Técnico do Projeto Opções de
Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa
em Setores-Chave do Brasil**

Régis Rathmann

EQUIPE TÉCNICA

Andréa Nascimento de Araújo

Lidiane Rocha de Oliveira Melo

Marcela Cristina Rosas Aboim Raposo

*Moema Vieira Gomes Corrêa (Diretora Nacional do
Projeto até outubro de 2016)*

Rodrigo Henrique Macedo Braga

Sonia Regina Mudrovitsch de Bittencourt

Susanna Erica Busch

EQUIPE ADMINISTRATIVA

Ana Carolina Pinheiro da Silva

Andréa Roberta dos Santos Campos

Maria do Socorro da Silva Lima

Ricardo Morão Alves da Costa

EQUIPE TÉCNICA DA ONU MEIO AMBIENTE

Francine Costa Vaurof

Patricia Taboada

Guilherme Sattamini

Maria Claudia Cambraia

AUTORES E COLABORADORES

André Frossard Pereira de Lucena (Coordenador)

Bernardo Machado

Eveline Maria Vásquez Arroyo

Mauro Francisco Chavez Rodriguez

Monica Costa e Silva Chagas

Rafael Garaffa

Raul Figueiredo Carvalho Miranda

Raymundo Moniz de Aragão Neto

Rosa Esperanza González Mahecha

Talita Borges Cruz

Revisão

Anna Cristina de Araújo Rodrigues

Projeto Gráfico

Capitular Design Editorial

Editoração e diagramação

Phábrica de Produções:

Alecsander Coelho, Daniela Bissiguini,

Ércio Ribeiro, Icaro Bockmann, Marcel Casagrande,

Marcelo Macedo, Paulo Ciola, Kauê Rodrigues

e Rodrigo Alves



Sumário

INTRODUÇÃO	31
1 CARACTERIZAÇÃO DOS SETORES: USO DE ENERGIA E EMISSÕES	35
1.1 SETOR RESIDENCIAL	35
1.1.1 Consumo de energia	35
1.1.2 Emissões de CO ₂	37
1.2 SETOR DE COMÉRCIO E SERVIÇOS	39
1.2.1 Consumo de energia	39
1.2.2 Emissões de CO ₂	41
1.3 SETOR PÚBLICO	42
1.3.1 Consumo de energia	42
1.3.2 Emissões de CO ₂	44
2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	47
2.1 SETOR RESIDENCIAL, COMERCIAL E SERVIÇOS E PÚBLICO	47
2.1.1 Iluminação	47
2.1.2 Climatização	53
2.1.3 Refrigeração	58
2.1.4 Cocção	63
2.1.5 Aquecimento de água	68
2.1.6 Outros usos	81
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	89
2.2.1 Geração eólica distribuída	89
2.2.2 Geração fotovoltaica distribuída.....	91

3	METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO ANO-BASE.....	99
3.1	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	99
3.2	AJUSTE DO ANO-BASE PELO MODELO TOP-DOWN	100
3.2.1	Setor residencial.....	100
3.3	AJUSTE DO ANO-BASE PELO MODELO BOTTOM-UP	102
3.3.1	População e demografia.....	102
3.3.2	Setor residencial.....	103
3.4	SETOR COMERCIAL E SERVIÇOS.....	129
3.5	SETOR PÚBLICO	135
3.5.1	Iluminação pública.....	135
3.6	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	136
4	CENÁRIO DE REFERÊNCIA	139
4.1	PREMISSAS GERAIS	139
4.1.1	POPULAÇÃO E DEMOGRAFIA	139
4.1.2	Economia.....	142
4.2	SETOR RESIDENCIAL	143
4.2.1	Iluminação	143
4.2.2	Climatização.....	147
4.2.3	Refrigeração.....	151
4.2.4	Cocção	157
4.2.5	Aquecimento de água	159
4.2.6	Outros usos	162
4.3	SETOR COMERCIAL E SERVIÇOS.....	164
4.4	SETOR PÚBLICO.....	170
4.4.1	Iluminação pública	172
4.5	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	174
4.5.1	Geração distribuída eólica	175
4.5.2	Geração distribuída fotovoltaica.....	179

4.6 RESULTADOS AGREGADOS	184
4.6.1 Setor residencial.....	184
4.6.2 Setores de serviços, comercial e público.....	185
4.6.3 Emissões de CO ₂	186
5 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO.....	189
5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	189
5.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	190
5.2.1 Procedimento de cálculo do potencial e custo das medidas de mitigação.....	192
5.3 PREMISSAS GERAIS	193
5.3.1 Preço da energia	193
5.3.2 Fator de emissão do <i>grid</i>	194
5.3.3 Taxa de desconto.....	195
5.4 PREMISSAS E RESULTADOS DO SETOR RESIDENCIAL	199
5.4.1 Iluminação	199
5.4.2 Climatização.....	202
5.4.3 Refrigeração.....	206
5.4.4 Cocção.....	213
5.4.5 Aquecimento de água	217
5.5 PREMISSAS E RESULTADOS DOS SETORES COMERCIAL, SERVIÇOS E PÚBLICO.....	223
5.5.1 Climatização	223
5.5.2 Eficientização da iluminação	229
5.5.3 Iluminação pública.....	232
5.6 PREMISSAS E RESULTADOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	234
5.6.1 Premissas.....	234
5.6.2 Custo nivelado	235
5.6.3 Potencial fotovoltaico	237
5.6.4 Penetração máxima de painéis.....	239
5.6.5 Custo de abatimento.....	240



Listas de tabelas,
figuras, quadros e
siglas e acrônimos

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo Final de Energia por Fonte Energética e Uso no Setor Residencial em 2010 (ktep)	29
Tabela 2 – Consumo Final de Energia por Fonte e Uso no Setor Comercial e Serviços (2010 em ktep)	32
Tabela 3 – Consumo Final de Energia por Fonte e Uso em Edificações do Setor Público (2010 em ktep)	36
Tabela 4 – Performance de Algumas Classes de Lâmpadas LED	43
Tabela 5 – Preços de Várias Classes de Lâmpadas (US\$/1.000 lm).....	44
Tabela 6 – Eficácia e Tempo de Vida da Tecnologia OLED para Luminárias ...	45
Tabela 7 – MTD de Iluminação Reportadas no Inmetro.....	45
Tabela 8 – Níveis Mínimos do Coeficiente de Eficiência Energética para Condicionadores de Ar Tipo Janela.....	47
Tabela 9 – Eficiência de Equipamentos Convencionais de Ar-condicionado para Setores Comerciais.....	49
Tabela 10 – Níveis Máximos de Consumo (C/Cp) para Refrigeradores e Congeladores	51
Tabela 11 – Modelos Equivalentes Tomados para Representar os Refrigeradores no Brasil.....	52
Tabela 12 – Participação dos Gastos com Alimentação e Gás Domésticos nas Despesas das Famílias Brasileiras	56
Tabela 13 – MTD para Cocção de Alimentos (2014)	59
Tabela 14 – Classificação dos Chuveiros Elétricos Comercializados segundo a Classe de Potência do Equipamento e Utilização Indicada	61

Tabela 15 – MTD de Passagem Disponíveis para Gás Natural (2014).....	67
Tabela 16 – MTD de Passagem para GLP (2014).....	68
Tabela 17 – MTD de Chuveiro Elétrico (2014)	69
Tabela 18 – MTD de Aquecedores de Passagem no Mercado Norte-americano (2014)	70
Tabela 19 – Classe de Etiquetagem de Coletor Solar Aplicação Banho.....	70
Tabela 20 – Classe de Etiquetagem de Coletor Solar Aplicação Piscina.....	71
Tabela 21 – Classe de Eficiência, Atribuída pelo Estudo, para Reservatório Térmico.....	72
Tabela 22 – Classificação dos Televisores segundo a Classe de Potência no Modo <i>Stand-by</i>	74
Tabela 23 – Classificação dos Fornos Micro-ondas segundo Sua Eficiência	75
Tabela 24 – Classificação das Lavadoras de Roupas segundo Consumo Específico de Energia Água Fria (kWh/ciclo/Kg)	76
Tabela 25 – Classificação dos Ventiladores de Teto por Classes de Eficiência Energética [(m ³ /s)/W]	78
Tabela 26 – Classificação dos Ventiladores de Mesa, Parede, Pedestal e Circuladores de Ar (%).....	79
Tabela 27 – Ferros de Passar do Programa de Análises de Produtos Inmetro.....	79
Tabela 28 – MTD Lavadora de Roupas Semiautomática.....	80
Tabela 29 – MTD Aparelho Televisor	80
Tabela 30 – MTD Aparelho Forno de Micro-ondas	80
Tabela 31 – MTD Lavadora de Roupas Automática	80
Tabela 32 – MTD Ventilador de Teto.....	81
Tabela 33 – Classe de Etiquetagem PBE de Silício Cristalino	84
Tabela 34 – Classe de Etiquetagem PBE de Filmes Finos	85
Tabela 35 – Eficiência de Células de Silício Cristalino	87
Tabela 36 – Eficiência de Células de Filme Fino (%)	88
Tabela 37 – Fator de Emissão para o Consumo de Eletricidade no Setor de Edificações.....	92

Tabela 38 – Consumo Final de Energia por Fonte do Setor Residencial (2010 em ktep)	92
Tabela 39 – Consumo Final de Energia por Fonte e Uso Final do Setor Residencial (2010 em ktep).....	94
Tabela 40 – Dados Demográficos Relativos a População, Domicílios e Pessoas por Domicílio no Brasil e Regiões (2010)	95
Tabela 41 – Estimativa de Posse Média de Lâmpadas por Região no Brasil (2010).....	98
Tabela 42 – Tempo de Utilização por Tipo de Lâmpadas (horas)	99
Tabela 43 – Tempo de Utilização das Lâmpadas por Região e Período (horas).....	99
Tabela 44 – Carga Térmica Estimada (kWh) por Períodos do Ano e Regiões para Equipamento de Ar-condicionado de 9.000 BTU	106
Tabela 45 – Tempo de Utilização (horas) por Períodos do Ano e Regiões por Ventilador.....	106
Tabela 46 – Posse de Fogão e Energéticos Utilizados na Cocção (2009-2011 em %).....	113
Tabela 47 – Consumo Específico <i>Per Capita</i> na Cocção por Energético (2010)	113
Tabela 48 – Participação das Fontes de Energia no Aquecimento de Água por Região do Brasil (2005 em %)	115
Tabela 49 – Participação dos Energéticos no Aquecimento de Água (2010 em %)	115
Tabela 50 – Consumo Específico <i>Per Capita</i> no Aquecimento de Água por Energético (2010)	116
Tabela 51 – Média de Consumo <i>Per Capita</i> de Aquecedores de Água por Selo.....	116
Tabela 52 – Posse Média de Equipamentos por Domicílio Correspondentes a Outros Usos (2010).....	119
Tabela 53 – Potências Nominais e Frequência de Uso dos Eletrodomésticos.....	120
Tabela 54 – Consumo de Eletricidade por Tipo de Edificação nos EUA (2003 em %)	121
Tabela 55 – Consumo de Gás Natural por Tipo de Edificação nos EUA (2003 em %)	122

Tabela 56 – Destinação do Consumo de Eletricidade – Setor Comercial e Serviços (%).....	123
Tabela 57 – Destinação do Consumo de Combustíveis – Setor Comercial e Serviços (%).....	124
Tabela 58 – Custos com Eletricidade, Água e Esgoto (2010)	124
Tabela 59 – Consumo por Uso Final e Tipo de Edificação do Setor Comercial e Serviços (2010 em ktep)	126
Tabela 60 – Parque de Iluminação Pública (2008).....	127
Tabela 61 – Consumo de Energia por Tipo de Tecnologia Utilizada na Iluminação Pública.....	128
Tabela 62 – Valor Adicionado em Segmentos Econômicos Seleccionados (2010-2050 em milhões R\$)	134
Tabela 63 – Evolução Posse Média de Lâmpadas por Tecnologia e Região (2010/2050)	136
Tabela 64 – Consumo Específico <i>Per Capita</i> na Cocção no Cenário REF ...	149
Tabela 65 – Consumo Específico Médio <i>Per Capita</i> no Aquecimento de Água (2010).....	153
Tabela 66 – Evolução Posse de Televisão no Cenário REF por Região (2010-2050)	154
Tabela 67 – Evolução Posse de Computador no Cenário REF por Região (2010-2050).....	155
Tabela 68 – Características das Tecnologias para Ar-condicionado Utilizadas no Setor Comercial e Serviços.....	159
Tabela 69 – Consumo de Energia do Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2050 em ktep)	161
Tabela 70 – Consumo de Energia Projetado em Prédios Públicos no Cenário REF (2010-2050 em ktep).....	163
Tabela 71 – Consumo de Energia da Iluminação Pública no Cenário REF (2010- 2050 em ktep)	166
Tabela 72 – Potência Máxima Permitida para Sistemas Eólicos de Pequeno Porte	168
Tabela 73 – Estimativa de Evolução dos Custos da Geração Distribuída Fotovoltaica.....	173
Tabela 74 – Consumo Anual Médio de Energia e Capacidade Fotovoltaica Permitida por Região do País.....	174

Tabela 75 – Capacidade Instalada e Geração de Energia no Cenário REF (2015-2050)	176
Tabela 76 – Preço da Energia por Fonte, Setor e Região para Cálculo do Custo de Abatimento (valores em US\$/MWh)	186
Tabela 77 – Média Geométrica dos Índices de Curto, Médio e Longo Prazo para Cálculo da Taxa de Desconto do Setor Residencial (% a.a.).....	188
Tabela 78 – Cálculo da Taxa de Desconto do Setor Residencial (% a.a.).....	189
Tabela 79 – Vida Útil Considerada para as Tecnologias de Iluminação no Setor Residencial.....	191
Tabela 80 – Custos das Tecnologias de Iluminação Utilizadas no Setor Residencial (US\$)	192
Tabela 81 – Características e Custos das Tecnologias para Ar-condicionado Utilizadas no Setor Residencial.....	195
Tabela 82 – Características e Custos das Tecnologias de Geladeiras Utilizadas no Setor Residencial	199
Tabela 83 – Características e Custos das Tecnologias de <i>Freezers</i> Utilizados	202
Tabela 84 – Quantidade Abatida e Custo de Abatimento por Medida (cocção)	209
Tabela 85 – Vida Útil e Preços de Chuveiros Elétricos, Aquecedores a Gás Natural e SAS.....	210
Tabela 86 – Fração Solar Média por Região (em %)	211
Tabela 87 – Quantidade Abatida e Custo de Abatimento por Medida (aquecimento de água)	215
Tabela 88 – Estimativa da Evolução do Custo da Tecnologia (2015-2050)	227
Tabela 89 – Potencial do Setor Residencial Brasileiro por Região (2015-2050).....	230
Tabela 90 – Área Média por Tipo de Estabelecimento Educacional.....	231
Tabela 91 – Potencial, Custo Marginal e Total de Abatimento das Medidas de Mitigação Aplicáveis ao Setor de Edificações.....	235
Tabela 92 – Desempenho de uma Pilha Combustível no Setor de Edificações.....	252
Tabela 93 – Potencial, Custo Marginal e Total de Abatimento das Medidas de Mitigação Aplicáveis ao Setor de Edificações	265

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de Energia do Setor Residencial por Fonte (2001-2010)	28
Figura 2 – Participação das Fontes Energéticas no Consumo de Energia do Setor Residencial (2010).....	28
Figura 3 – Emissões de CO ₂ do Setor Residencial por Fonte (2003-2012)	30
Figura 4 – Participação das Fontes Energéticas nas Emissões de CO ₂ do Setor Residencial (2010)	30
Figura 5 – Consumo de Energia do Setor Comercial e Serviços por Fonte (2003-2010).....	31
Figura 6 – Participação das Fontes Energéticas no Consumo de Energia do Setor Comercial e Serviços (2010)	32
Figura 7 – Emissões de CO ₂ no Setor Comercial e Serviços (2003-2010)	33
Figura 8 – Participação por Fonte Energética nas Emissões de CO ₂ do Setor Comercial e Serviços (2010).....	34
Figura 9 – Consumo de Energia das Edificações do Setor Público por Fonte (2003-2010).....	35
Figura 10 – Participação das Fontes Energéticas no Consumo de Energia das Edificações do Setor Público (2010).....	35
Figura 11 – Emissões de CO ₂ das Edificações do Setor Público (2003-2012).....	37
Figura 12 – Participação das Fontes Energéticas nas Emissões de CO ₂ das Edificações do Setor Público (2010)	37
Figura 13 – Modelos de LFC 127 V e 220 V Comercializadas e Registrados no Inmetro	41
Figura 14 – Modelos de Lâmpadas Incandescentes Comercializadas e Registradas no Inmetro	41
Figura 15 – Eficiência Típica de Lâmpadas e Desenvolvimento Esperado até 2020.....	42
Figura 16 – Lâmpadas LED	43
Figura 17 – Aprimoramento de Eficiência de Lâmpadas versus Preço	44
Figura 18 – Coeficiente de Eficiência Energética dos Condicionadores de Ar Aprovados pelo PBE	48
Figura 19 – Tendências de EER nos Equipamentos Mais Eficientes de Ar-condicionado	50

Figura 20 – Consumo de Energia por Unidade de Volume dos Refrigeradores no Mercado Brasileiro segundo Faixa de Classificação do PBE.....	52
Figura 21 – Consumo de Energia por Unidade de Volume dos Congeladores Verticais no Mercado Brasileiro segundo Faixa de Classificação do PBE	53
Figura 22 – Consumo de Energia por Unidade de Volume dos Congeladores Horizontais no Mercado Brasileiro segundo Faixa de Classificação do PBE.....	54
Figura 23 – Consumo de Energia Anual <i>versus</i> Capacidade dos Refrigeradores Energy Star Most Efficient, A+++ da União Europeia e Etiqueta A do Procel.....	54
Figura 24 – Consumos de Energia Anual <i>versus</i> Capacidade dos Freezers Energy Star, A+++, da União Europeia, e etiqueta A, do Procel.....	55
Figura 25 – Utilização Preferencial de Combustível para Cocção (2012)	57
Figura 26 – Distribuição dos Fogões Comercializados segundo Eficiência dos Queimadores	58
Figura 27 – Distribuição dos Cooktops Comercializados segundo Eficiência dos Queimadores	58
Figura 28 – Distribuição dos Chuveiros Elétricos Comercializados segundo a Classe de Potência do Equipamento (número de modelos etiquetados).....	62
Figura 29 – Distribuição dos Aquecedores Instantâneos a Gás Natural Comercializados por Faixa de Eficiência (número de equipamentos etiquetados).....	62
Figura 30 – Distribuição dos Aquecedores Instantâneos a GLP Comercializados por Faixa de Eficiência (número de equipamentos etiquetados)	63
Figura 31 – Tubos Coletores para Coletor Plano Fechado	64
Figura 32 – Eficiência de Coletores por Tecnologia em função do Diferencial de Temperatura	66
Figura 33 – Classificação do Coletor Solar em função de Sua Energia Específica.....	71
Figura 34 – Reservatórios Térmicos por Classe de Eficiência e Pressão de Trabalho	72

Figura 35 – Reservatórios por Classe e Capacidade (L)	73
Figura 36 – Faixa de Idade dos Televisores (2005)	74
Figura 37 – Distribuição dos Televisores Comercializados segundo a Classe de Potência do Equipamento no Modo <i>Stand-by</i> (número de modelos etiquetados).....	75
Figura 38 – Distribuição dos Fornos de Micro-ondas Comercializados segundo Eficiência (número de modelos etiquetados)	76
Figura 39 – Distribuição das Máquinas de Lavar Comercializadas segundo Eficiência (número de modelos etiquetados)	77
Figura 40 – Distribuição dos Ventiladores Comercializados segundo Eficiência (número de modelos etiquetados).....	78
Figura 41 – Produção de Turbinas de Pequeno Porte por Tipo.....	82
Figura 42 – Classificação PBE do Módulo em função de Sua Eficiência..	84
Figura 43 – Módulos por Classe e Potência Nominal	85
Figura 44 – Estrutura de Célula Cristalina	86
Figura 45 – Cortes de Filme Fino.....	88
Figura 46 – Demanda de Energia Residencial por Uso Final (%).....	93
Figura 47 – Posse de Lâmpadas por Domicílio no Brasil e Regiões (2005).....	97
Figura 48 – Unidades Importadas de Lâmpadas para Diferentes Tipos (1999-2013)	97
Figura 49 – Taxa de Penetração de Lâmpadas Fluorescentes e Incandescentes.....	98
Figura 50 – Distribuição do Consumo de Energia para o Uso Iluminação no Brasil (2010)	100
Figura 51 – Posse de Ar-condicionado por Tipo e Regiões Estimada no Brasil (2010)	102
Figura 52 – Posse de Ventilador por Tipo e Regiões Considerada no Brasil (2010).....	103
Figura 53 – Temperaturas por Regiões para Dias Típicos (2010).....	105
Figura 54 – Consumo de Energia do Uso e Ar-condicionado por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010).....	106
Figura 55 – Consumo de Energia do Uso de Ventiladores por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)	107

Figura 56 – Posse de Geladeiras por Regiões e no Brasil no Setor Residencial (2010)	108
Figura 57 – Posse de <i>Freezers</i> por Regiões e no Brasil no Setor Residencial (2010)	109
Figura 58 – Consumo de Energia <i>versus</i> Volume para Diferentes Geladeiras com Etiquetagem de Maior Eficiência nos EUA, Brasil e UE	109
Figura 59 – Consumo de Energia das Geladeiras por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)	111
Figura 60 – Consumo de Energia dos <i>Freezers</i> por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)	111
Figura 61 – Consumo de Energia Total no Uso de Refrigeração por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)	112
Figura 62 – Participação dos Energéticos no Consumo de Energia da Cocção no Setor Residencial (2010)	114
Figura 63 – Participação dos Energéticos no Consumo de Energia do Aquecimento de Água no Setor Residencial (2010)	117
Figura 64 – Participação das Regiões no Consumo de Energia do Aquecimento de Água no Setor Residencial (2010)	118
Figura 65 – Posse Média do Equipamento Microcomputador (2005-2012)	120
Figura 66 – Distribuição de Consumo de Energia no Brasil para Outros Usos (2010)	121
Figura 67 – Distribuição do Consumo por Uso Final em Edifícios Comerciais em Média Tensão	122
Figura 68 – Distribuição do Consumo de Energia Elétrica nos Setores de Hotéis, <i>Shopping Centers</i> e Hospitais	123
Figura 69 – Destinação do Consumo de Eletricidade de Supermercados e Hipermercados	125
Figura 70 – Distribuição do Consumo de Combustíveis por Tipo de Estabelecimento	126
Figura 71 – Participação de Cada Região na População Brasileira (2030)	132
Figura 72 – Projeção da População Brasileira por Região (2010-2050)	132
Figura 73 – Projeção da Quantidade de Domicílios por Região (2010-2050)	133

Figura 74 – Projeção da Quantidade de Habitantes por Domicílio por Região (2010-2050)	134
Figura 75 – Projeção de Lâmpadas no Cenário REF por Tecnologia (2010-2050).....	136
Figura 76 – Vendas de Lâmpadas no Cenário REF por Tecnologia (2010-2050)	137
Figura 77 – Consumo de Energia do Uso Iluminação no Cenário REF por Região (2010-2050)	138
Figura 78 – Consumo de Energia do Uso Iluminação no Cenário REF por Tipo de Tecnologia (2010-2050)	138
Figura 79 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado no Cenário REF por Tecnologia (2001-2049)	139
Figura 80 – COP Representativo dos Equipamentos de Ar-condicionado por Tecnologia (2010-2050)	140
Figura 81 – Projeção de Equipamentos de Ar-condicionado Instalados no Cenário REF por Tecnologia (2010-2050).....	140
Figura 82 – Projeção de Posse de Ar-condicionado no Cenário REF por Região (2010-2050)	141
Figura 83 – Consumo de Energia dos Equipamentos de Ar-condicionado no Cenário REF por Região (2010-2050)	141
Figura 84 – Consumo de Energia dos Ventiladores no Cenário REF por Região (2010-2050).....	142
Figura 85 – Consumo de Energia do Uso Climatização no Cenário REF por Equipamento (2010-2050).....	143
Figura 86 – Projeção de Vendas de Geladeiras no Cenário REF (2010-2050)	144
Figura 87 – Projeção de Estoque de Geladeiras no Cenário REF (2010-2050)	144
Figura 88 – Consumo de Energia das Geladeiras no Cenário REF por Região (2010-2050)	145
Figura 89 – Rendimentos dos <i>Freezers</i> Verticais das Tabelas Inmetro (2014).....	146
Figura 90 – Rendimentos dos <i>Freezers</i> Horizontais das Tabelas Inmetro (2014).....	146
Figura 91 – Projeção de Vendas de <i>Freezers</i> no Cenário REF (2010-2050)...	147
Figura 92 – Projeção de Estoque de <i>Freezers</i> no Cenário REF (2010-2050) ...	147

Figura 93 – Consumo de Energia dos <i>Freezers</i> no Cenário REF por Região (2010-2050).....	148
Figura 94 – Consumo de Energia do Uso Refrigeração no Cenário REF por Equipamento (2010-2050)	148
Figura 95 – Participação dos Energéticos na Cocção no Cenário REF (2010-2050).....	149
Figura 96 – Consumo Específico <i>Per Capita</i> na Cocção no Cenário REF por Energético (2010-2050)	150
Figura 97 – Consumo de Energia do Uso Cocção no Cenário REF por Energético (2010-2050)	150
Figura 98 – Participação das Fontes de Energia no Aquecimento de Água (2010-2050)	152
Figura 99 – Consumo Específico <i>Per Capita</i> no Aquecimento de Água (2010-2050)	152
Figura 100 – Consumo de Energia do Aquecimento de Água no Cenário REF por Energético (2010-2050).....	153
Figura 101 – Consumo de Energia dos Outros Usos no Cenário REF por Tipo de Equipamento (2010-2050).....	156
Figura 102 – Correlação entre Consumo Energético e PIB	157
Figura 103 – Correlação entre Consumo Energético e PIB (números índices)	157
Figura 104 – Taxa de Climatização Projetada para o Setor Comercial e Serviços (2010-2050)	159
Figura 105 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2010-2050)	160
Figura 106 – Projeção de Potência Instalada de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2010-2050)	160
Figura 107 – Consumo Total de Energia do Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2010-2050)	161
Figura 108 – Correlação entre Consumo Energético e PIB (números índices) no Setor Público.....	162
Figura 109 – Consumo de Energia em Prédios Públicos no Cenário REF (2010-2050)	163
Figura 110 – Participação de Tecnologias em Iluminação Pública no Cenário REF (2010-2050 em %)	164

Figura 111 – Correlação entre Consumo Energético e PIB (números índices) – Iluminação Pública	165
Figura 112 – Consumo de Energia da Iluminação Pública no Cenário REF (2010-2050).....	166
Figura 113 – Capacidade Instalada de Geração Distribuída Eólica no Cenário REF por Região (2010-2050)	169
Figura 114 – Participação Percentual das Regiões na Capacidade Instalada de Geração Distribuída Eólica no Cenário REF (2010-2050).....	170
Figura 115 – Fator de Capacidade Máximo (Max) e Mínimo (Min) para as Regiões Empregadas por Estado, em Ordem Crescente, com Base no Fator de Capacidade Máximo	170
Figura 116 – Relação entre o Rendimento Médio de Sistemas e o Crescimento da Capacidade Instalada (2010-2050)	171
Figura 117 – Área de Abrangência no País para os 20 Dados de Radiação Solar Utilizados.....	173
Figura 118 – Capacidade Instalada da Geração Distribuída Fotovoltaica por Regiões (2010-2050).....	175
Figura 119 – Participação por Região na Capacidade Instalada da Geração Distribuída Fotovoltaica no Cenário REF (2010-2050)	175
Figura 120 – Capacidade Instalada por Dado de Radiação Solar e Respectivo Fator de Capacidade (FC) por Municípios	176
Figura 121 – Consumo Total de Energia por Uso Final do Setor Residencial no Cenário REF (2010-2050)	177
Figura 122 – Consumo Total de Energia por Uso Final nos Setores Comercial, Serviços e Público no Cenário REF (2010-2050)	178
Figura 123 – Emissões de CO ₂ no Cenário REF (2010-2050)	179
Figura 124 – Fator de Emissão da Geração Elétrica (2010 a 2050).....	187
Figura 125 – Projeção de Lâmpadas no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050).....	192
Figura 126 – Vendas de Lâmpadas no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050)	193
Figura 127 – Emissões e Consumo de Energia por Cenário (2010-2050).....	194
Figura 128 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado por Tecnologia no Cenário BC (2010-2050).....	195
Figura 129 – Projeção de Equipamentos de Ar-condicionado por Tecnologia no Cenário BC (2010-2050).....	196

Figura 130 – Energia Consumida e Emissões de CO ₂ Evitadas pelos Equipamentos de Ar-condicionado nos Cenários REF e BC (2010-2050).....	196
Figura 131 – Capex e Opex do Ar-condicionado no Cenário REF (2010-2050).....	197
Figura 132 – Capex e Opex do Ar-condicionado no Cenário BC (2010-2050).....	197
Figura 133 – Projeção de Vendas de Geladeiras para o Setor Residencial no Cenário BC (2010-2050).....	199
Figura 134 – Projeção de Estoque de Geladeiras para o Setor Residencial no Cenário BC (2010-2050).....	200
Figura 135 – Energia Consumida e Emissões de CO ₂ Evitadas pelas Geladeiras no Setor Residencial nos Cenários REF e BC	200
Figura 136 – Capex e Opex da Geladeira a Valor Nominal no Cenário REF (2010-2050)	201
Figura 137 – Capex e Opex da Geladeira a Valor Nominal no Cenário BC (2010-2050)	201
Figura 138 – Projeção de Vendas de <i>Freezers</i> no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050)	202
Figura 139 – Projeção de Estoque de <i>Freezers</i> no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050)	203
Figura 140 – Energia Consumida e Emissões de CO ₂ Evitadas pelos <i>Freezers</i> no Setor Residencial nos Cenários REF e BC (2010-2050)	203
Figura 141 – Capex e Opex de <i>Freezer</i> a Valor Nominal no Cenário REF (2010-2050).....	204
Figura 142 – Capex e Opex de <i>Freezer</i> a Valor Nominal no Cenário REF (2010-2050)	204
Figura 143 – Participação das Fontes na Cocção nos Domicílios (2013-2050).....	205
Figura 144 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficientização de Fogões a GLP (2010-2050 em milhões de US\$)	206
Figura 145 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficientização de Fogões a Gás Natural (2010-2050 em milhões de US\$)	207
Figura 146 – Consumo de Energia de Fogões a GLP e Quantidade de CO ₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050).....	208

Figura 147 – Consumo de Energia de Fogões a Gás Natural e Quantidade de CO ₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050)	208
Figura 148 – Aquecimento de Água para Banho nos Domicílios por Fonte no Cenário BC (2013-2050)	210
Figura 149 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficientização de Chuveiros Elétricos (2010-2050 em milhões US\$)	211
Figura 150 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficientização de Aquecedores a Gás Natural (2010-2050 em milhões de US\$)	212
Figura 151 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Substituição de Chuveiros Elétricos por SAS (2010-2050 em milhões de US\$)....	212
Figura 152 – Consumo de Energia por Chuveiros Elétricos e Quantidade de CO ₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050)	213
Figura 153 – Consumo de Energia de Aquecedores a Gás Natural e Quantidade de CO ₂ Abatida nos Cenários REF e BC	214
Figura 154 – Consumo Evitado de Energia pelo SAS versus Quantidade de CO ₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050)	214
Figura 155 – Área Útil Projetada no Setor Comercial e Serviços (2010-2050).....	217
Figura 156 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário BC (2010-2050).....	218
Figura 157 – Projeção de Potência Instalada de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário BC (2010-2050)	218
Figura 158 – Energia Consumida e Emissões de CO ₂ Evitadas pelos Equipamentos de Ar-condicionado no Setor Comercial e Serviços nos Cenários REF e BC	219
Figura 159 – Capex e Opex do Ar-condicionado a Valor Nominal no Cenário REF no Setor Comercial e Serviços (2010-2050).....	220
Figura 160 – Capex e Opex do Ar-condicionado a Valor Nominal no Cenário BC no Setor Comercial e Serviços (2010-2050)	220
Figura 161 – Demanda de Iluminação (2010 -2050 em 1.000.000 lm) ..	221
Figura 162 – Participação de Tecnologias de Iluminação no Cenário BC (2010-2050)	222
Figura 163 – Consumo de Eletricidade por Iluminação nos Cenários REF e BC (GWh, 2010-2050).....	223
Figura 164 – Emissões da Iluminação nos Cenários REF e BC (MtCO ₂ , 2010-2050)	223

Figura 165 – Demanda em Iluminação Pública por Região (2010-2050 em 1.000.000 lm)	224
Figura 166 – Participação de Tecnologias em Iluminação Pública no Cenário BC (2010-2050 em %)	225
Figura 167 – Consumo por Iluminação Pública nos Cenários REF e BC (2010-2050 em ktep)	225
Figura 168 – Emissões Decorrentes de Iluminação Pública nos Cenários REF e BC (2010-2050 em tCO ₂)	226
Figura 169 – Custo de Geração Fotovoltaica Adicional em relação ao Custo de Aquisição de Energia junto à Distribuidora, de Entrada do Sistema e Cada um dos Grupos Considerados (2010-2050 em US\$ 2010/MWh)	228
Figura 170 – Penetração Fotovoltaica Máxima Acumulada (2015-2050 em MWp)	232
Figura 171 – Potencial de Abatimento por Capacidade Instalada em função do Ano de Entrada (2015-2050)	233
Figura 172 – Curva de Custo de Abatimento para Medida Fotovoltaica (2015)	234
Figura 173 – Consumo de Energia e Emissões Evitadas Acumuladas	234
Figura 174 – Curva de Custo Marginal de Abatimento do Setor de Edificações	236
Figura 175 – Elementos de uma Edificação com Alto Desempenho Energético	241
Figura 176 – Pilha de Combustível	251
Figura 177 – Nível de Maturidade das Tecnologias de Armazenamento de Elétrica e Térmica	252
Figura 178 – Penetração de Domicílios ZEB (número de domicílios)	254
Figura 179 – Consumo Total de Energia nos Cenários REF, BC e BC+I e Emissões Totais Evitadas do Cenário BC+I com relação ao Cenário REF (2010-2050)	255
Figura 180 – Classificação dos Instrumentos de Política Pública, segundo IEA (2015)	265
Figura 181 – Percentual de Instrumentos Usados nas Políticas de Eficiência de Equipamentos, da Edificação e Envoltório em Países Selecionados (% sobre o total de instrumentos)	267

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos Principais Tipos de Lâmpadas	48
Quadro 2 – Turbina Eólica de Eixo Vertical versus Horizontal	91
Quadro 3 – Área Estimada por Tipo de Estabelecimento (2010)	224
Quadro 4 – Tecnologias de Envoltório da Edificação de acordo com Economia, Clima e Tipo de Construção	251
Quadro 5 – Recomendações de Aquecimento e Arrefecimento	254
Quadro 6 – Barreiras e Cobenefícios à Implementação das Atividades de Baixo Carbono no Setor de Edificações	269
Quadro 7 – Síntese dos Instrumentos de Política Pública Propostos para a Eficientização Energética de Equipamentos	278
Quadro 8 – Síntese dos Instrumentos de Política Pública Propostos para a Eficientização Energética da Edificação e Envoltório	282
Quadro 9 – Síntese dos Instrumentos de Política Pública Propostos para Promover a Geração Distribuída	287

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

AFOLU	– Agricultura, floresta e outros usos do solo
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	– Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AWEA	– American Wind Energy Association
BEN	– Balanço Energético Nacional
BEP	– Barril equivalente de petróleo
BEU	– Balanço de Energia Útil
BNDES	– Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
BTU	– <i>British Thermal Unit</i>
CAPEX	– Custo de capital
CAU	– Conselho de Arquitetura e Urbanismo
CCC	– Conta de consumo e combustíveis
CENÁRIO BC	– Cenário de baixo carbono
CENÁRIO BC+I	– Cenário de baixo carbono com inovação
CENÁRIO REF	– Cenário de referência
CLASP	– The Collaborative Labeling and Appliance Standards Program
CONPET	– Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural
COP	– <i>Coefficient of performance</i>
CREA	– Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura
CTCN	– Climate Technology Centre and Network
EER	– <i>Energy efficiency ratio</i>
ENAP	– Escola Nacional de Administração Pública
EPBD	– Directive on Energy Performance of Buildings
ESCO	– Empresas de Serviços de Conservação de Energia
FGTS	– Fundo de Garantia por Tempo de Serviço

FINEM – Financiamento a empreendimentos

FV – Fotovoltaico

GCF – Green Climate Fund

GEE – Gases de efeito estufa

GLP – Gás liquefeito de petróleo

GN – Gás natural

HFC – Hidrofluorcarboneto

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

LED – *Light-emitting diode*

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços

MF – Ministério da Fazenda

MME – Ministério de Minas e Energia

MP – Ministério do Planejamento

MTD – Melhores tecnologias disponíveis

OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OLED – *Organic light-emitting diode*

OPEX – Custos operacionais

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

P&D – Pesquisa e desenvolvimento

PLED – *Polymer organic light-emitting*

PME – Produção Mensal de Energia Específica

PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

PNEF – Plano Nacional de Eficiência Energética

POF – Pesquisa de Orçamentos Familiares

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PROESCO – Programa de Eficiência Energética do BNDES

PV – *Photovoltaics*

SAS – Sistema de aquecimento solar

SEBRAE – Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SENAC – Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

s.m. – Salário mínimo

SSL – Solid-state lighting

TCN – Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

TEP – Tonelada equivalente de petróleo

TIC – Tecnologias de informação e comunicação

TJLP – Taxa de Juros de Longo Prazo

TR – Tonelada de refrigeração

nZEB – Nearly zero energy building

NZEB – Net zero energy buildings

ZEB – Zero energy building



Introdução

INTRODUÇÃO

O uso de energia no setor de edificações é, em grande parte, responsável por uma série dos avanços em termos de bem-estar e qualidade de vida obtidos ao longo dos séculos XX e XXI. A energia é utilizada em edificações para prover uma variedade de serviços que incluem conforto, higiene, preparação e conservação de alimentos, entretenimento e comunicações (GEA, 2012).

O setor de edificações é comumente separado entre os setores residencial – moradia – e comercial e de serviços. Enquanto no primeiro o uso de energia está diretamente ligado à qualidade de vida das pessoas, ao tempo gasto com serviços domésticos e às atividades de lazer, o segundo é responsável por uma grande parcela da geração de renda e empregos.

Mundialmente, o setor de edificações corresponde a 32% do consumo energético final (24% residencial e 8% comercial) e 19% das emissões relacionadas a energia (LUCON et al., 2014). A principal fonte de energia consumida em edificações é a eletricidade. Quase 60% da eletricidade do mundo são consumidos em edificações comerciais e residenciais (GEA, 2012). A sustentabilidade do setor de edificações é, portanto, fundamental para o atingimento de metas de redução de emissões de GEE, ao mesmo tempo em que tem papel relevante na melhoria da qualidade de vida da população e no aumento de produtividade nos setores de comércio e serviços.

No Brasil, o setor de edificações representou 14,4% do total do consumo de energia em 2015, sendo os consumos do setor residencial, comercial e público de 24.951 ktep, 8.582 ktep e 3.980 ktep, respectivamente (EPE, 2016). Quando analisado o consumo de energia elétrica especificamente, o setor de edificações ganha importância ao se colocar como o principal consumidor dessa fonte. Em 2015, o consumo de energia elétrica no setor de edificações foi de 265 TWh (51% do consumo elétrico total de todos os setores) (EPE, 2016).

Apesar da importância do setor de edificações, poucos estudos avaliaram opções de mitigação específicas para o setor de edificações no Brasil, restringindo-se, geralmente, a medidas de eficiência energética (MELO et al., 2013). Este trabalho visa contribuir para preencher essa lacuna por meio do entendimento do papel do setor de edificações entre as estratégias de mitigação de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, no âmbito do projeto “Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil”. Este projeto tem por objetivo ajudar o governo brasileiro a reforçar sua capacidade técnica de apoiar a implementação de ações de mitigação de emissões de GEE nos principais setores da economia.

Dessa forma, o presente relatório tem por escopo o setor de edificações, que abrange os segmentos residencial, comercial e serviços, e público. O objetivo é estimar potenciais e custos de abatimento para o setor no período de 2010 a 2050. O estudo também pretende auxiliar na análise integrada das diferentes opções de mitigação em uma estrutura de otimização integrada, levando em conta a não aditividade das diferentes opções e outras considerações econômicas. Ademais, serão propostos instrumentos de política pública que incentivem a implementação das atividades setoriais de baixo carbono.

Para responder a esses objetivos, este relatório se organiza em sete capítulos, além desta introdução e das considerações finais. Inicialmente, serão caracterizadas as diferentes atividades do setor, com foco em processos produtivos, consumo de energia por fonte e específico e emissões diretas e indiretas. Em seguida, serão descritas as tecnologias atualmente utilizadas no setor, bem como as melhores tecnologias disponíveis (MTD) aplicáveis aos diferentes usos finais energéticos com vistas a reduzir emissões de GEE. No terceiro capítulo, serão apresentados os procedimentos metodológicos considerados na calibração do ano-base do estudo, qual seja, 2010. Nos capítulos 4, 5 e 6, serão construídos os cenários de referência (REF), baixo carbono (BC) e baixo carbono com inovação (BC+I), com foco no consumo de energia e nas emissões oriundas do setor de edificações. O cenário REF representa a linha de base para o setor de edificações. O cenário BC, por sua vez, abrange a quantificação de custos e potenciais de abatimento para as MTD aplicáveis ao setor, quais sejam, eficiência energética, troca de equipamentos, substituição de combustíveis e geração distribuída fotovoltaica. Além disso, inclui a análise conjunta dessas medidas em uma curva de custo marginal de abatimento setorial. O cenário BC+I trata de avaliar, adicionalmente ao cenário BC, a possibilidade e os impactos da inserção do conceito de edificações sem consumo de energia da rede (*zero energy buildings* – ZEB) no setor de edificações. Finalmente, no sétimo capítulo, avaliam-se barreiras e cobenefícios associados à adoção dos cenários de baixo carbono no setor para, partindo disso, serem propostos instrumentos de política pública visando à sua adoção.

Este relatório considera uma avaliação setorial, a qual não observa possíveis efeitos de não aditividade dos potenciais de mitigação do sistema energético. De fato, a avaliação setorial é relevante, sobretudo, para realizar o mapeamento das MTD, visando à mitigação setorial de emissões de GEE para, então, constituir uma base de dados com vistas à modelagem do setor de edificações em cenários integrados do sistema energético e do setor de agricultura, florestas e outros usos do solo (Afolu). Portanto, resultarão dos cenários integrados estimativas robustas dos potenciais e custos de abatimento desses setores, que serão reportadas no relatório intitulado “Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono”. Além disso, a avaliação setorial é relevante fonte de subsídios para os formuladores de políticas públicas elaborarem instrumentos tendo em vista a implementação de cenários de baixo carbono.



Caracterização dos setores: uso de energia e emissões

Capítulo

1

1 CARACTERIZAÇÃO DOS SETORES: USO DE ENERGIA E EMISSÕES

As emissões de GEE no setor de edificações estão integralmente associadas ao uso de energia, seja de forma direta (queima de combustíveis fósseis em edificações) ou de forma indireta (por meio do consumo de eletricidade, cujas emissões ocorrem no processo de geração de eletricidade). Portanto, os setores analisados neste relatório (residencial, comercial/serviços e público) serão caracterizados a seguir de acordo com consumo energético e nível de emissões de GEE.

Embora existam dados mais recentes de evolução do consumo de energia no setor, a caracterização se baseará em dados históricos até 2010, que é o ano-base considerado pelo estudo para fins de construção dos cenários REF, BC e BC+I.

1.1 SETOR RESIDENCIAL

O uso residencial da energia apresenta dois aspectos capazes de diferenciá-lo dos demais setores: a simplicidade de seus usos finais e a demanda específica requisitada por cada equipamento doméstico, com sua determinada função, o que acaba por formar consumos cativos de energia. Nesse segmento, a energia é utilizada basicamente com as seguintes finalidades: cocção, iluminação, aquecimento de água, condicionamento ambiental, conservação de alimentos e serviços energéticos gerais.

O consumo do setor residencial apresenta taxas de crescimento inferiores à média nacional, embora haja expansão da renda *per capita* em todos os cenários trabalhados. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da eficiência energética, em especial à maior penetração de equipamentos elétricos e à substituição de insumos menos eficientes, como lenha e carvão vegetal, que compensam a ampliação do número de equipamentos consumidores nas residências.

1.1.1 CONSUMO DE ENERGIA

Segundo dados do Balanço Energético Nacional – BEN 2015 (EPE, 2016), o setor residencial brasileiro apresentou em 2010 consumo energético final de 23.562 ktep.¹ Isso significa aumento de 13% em relação ao consumo de 2003. Na Figura 1, é possível observar a evolução desse consumo por fonte energética nos últimos sete anos.

1 ktep = mil tep = tep x 10³.

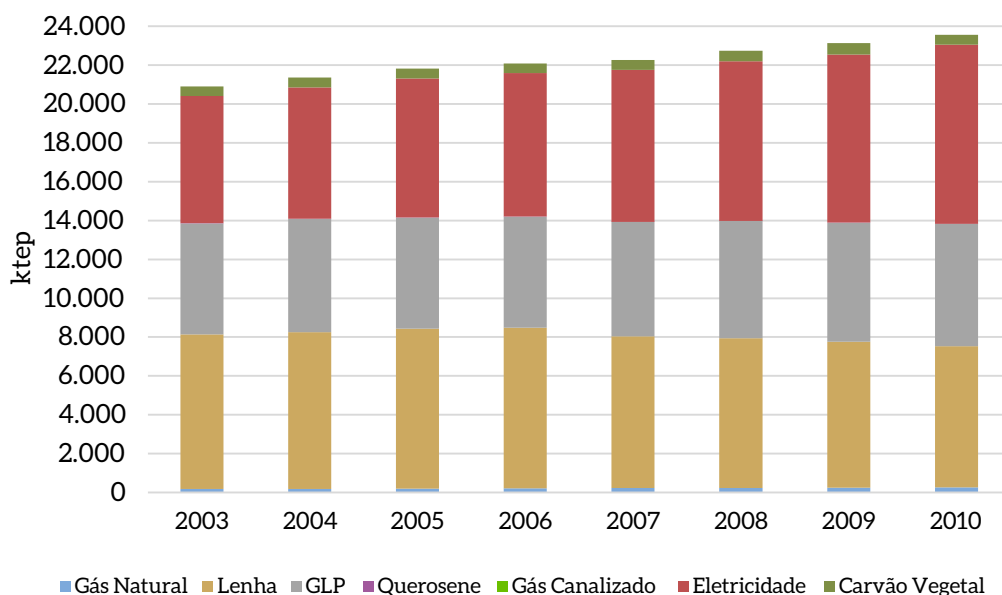


Figura 1 - Consumo de Energia do Setor Residencial por Fonte (2001-2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2016

A Figura 2 mostra a participação das fontes para o ano-base 2010. A eletricidade é a fonte mais representativa, seguida da lenha. Também é expressivo o consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP).

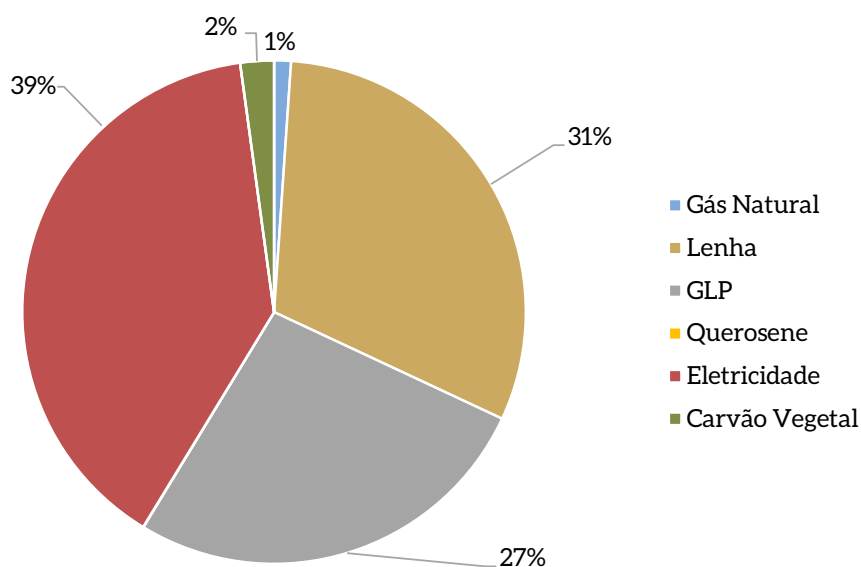


Figura 2 - Participação das Fontes Energéticas no Consumo de Energia do Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2016

Na Tabela 1, é apresentada a distribuição do consumo energético conforme uso final, de acordo com o Balanço de Energia Útil – BEU (MME, 2005). Pode-se observar que o aquecimento direto – que, para o setor, representa cocção de alimentos – é o uso mais significativo em termos absolutos (14.420,1 ktep).

Tabela 1 – Consumo Final de Energia por Fonte Energética e Uso no Setor Residencial em 2010 (ktep)

Fonte Energética	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Outras	Total
Gás natural	0,0	29,9	29,9	0,0	0,0	0,0	59,8
Óleo diesel	5,0	4,5	2,1	0,0	0,0	0,0	11,6
Óleo combustível	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3
GLP	0,0	0,0	380,8	0,0	0,0	0,0	380,8
Eletricidade	61,0	3,1	26,2	219,7	886,0	24,4	1.220,4
Total	66,0	40,9	439,0	219,7	886,0	24,4	1.676,0

Fonte: Elaboração própria a partir de MME, 2005; EPE, 2016

São diversos os usos da eletricidade no setor residencial. Iluminação, calor de processo (aquecimento de água) e refrigeração são os mais significativos.

1.1.2 EMISSÕES DE CO₂

As emissões de gases de dióxido de carbono pelo setor residencial, resultantes de atividade energética, são representadas na Figura 3. Em 2012, o valor era de aproximadamente 56 milhões de toneladas, com crescimento de 1,6% em relação a 2003. O baixo crescimento, quando comparado ao do consumo energético total, se refere principalmente à substituição da lenha e do carvão vegetal por gás natural e eletricidade, os quais têm menor fator de emissão no Brasil.

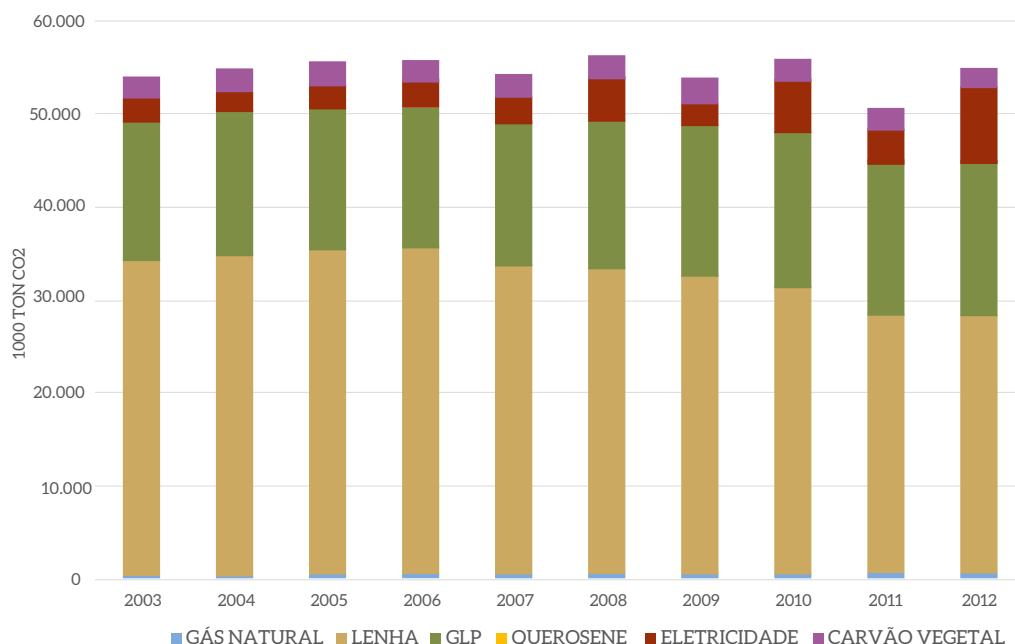


Figura 3 – Emissões de CO₂ do Setor Residencial por Fonte (2003-2012)

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTI, 2016a; EPE, 2013; IPCC, 2006

A participação das diversas fontes nas emissões, para 2010, é representada na Figura 4. Pode-se observar que a lenha é a principal fonte emissora, com 50% das estimativas totais (ante 27% no consumo), explicável pelo elevado fator de emissão em comparação com o da eletricidade.

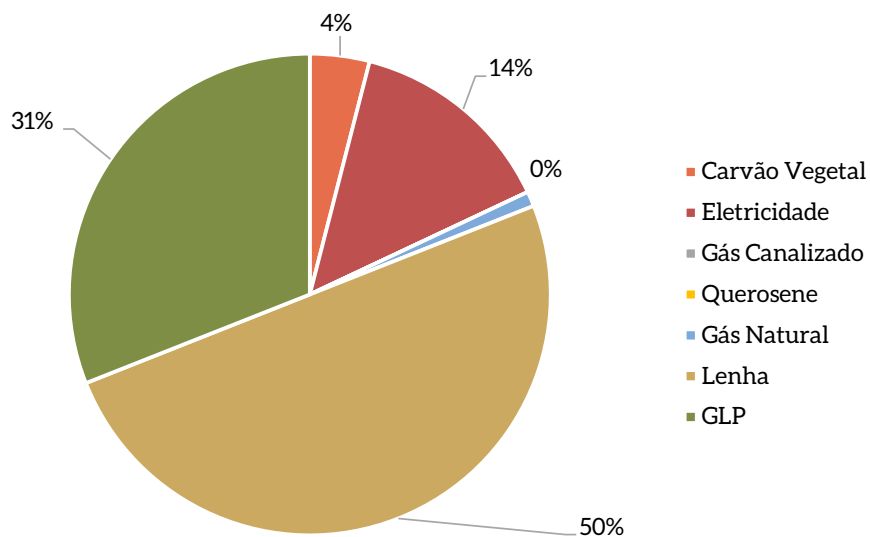


Figura 4 – Participação das Fontes Energéticas nas Emissões de CO₂ do Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTIC, 2016a; EPE, 2013; IPCC, 2006

Deve-se enfatizar que essas emissões foram estimadas a partir do consumo de energia constante da Tabela 1, aplicando-se os fatores de emissão constantes da Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (TCN) (MCTIC, 2016a).

1.2 SETOR DE COMÉRCIO E SERVIÇOS

O consumo de energia dos setores de comércio e serviços é apurado no BEN (EPE, 2013), sendo nele designado simplesmente como “Comercial”. O setor corresponde a atividades prestadas por organizações privadas, excetuados os prestadores de serviço de saneamento e abastecimento de água, cabendo, portanto, distinção de prestadores de serviço governamentais essencialmente por conta de sua natureza jurídica.

1.2.1 CONSUMO DE ENERGIA

Neste estudo, são considerados relevantes os valores de 2003 a 2010. Com isso, são minimizados os efeitos do racionamento de energia enfrentado pelo país em 2001. A Figura 5 representa os valores apresentados no BEN para o setor.

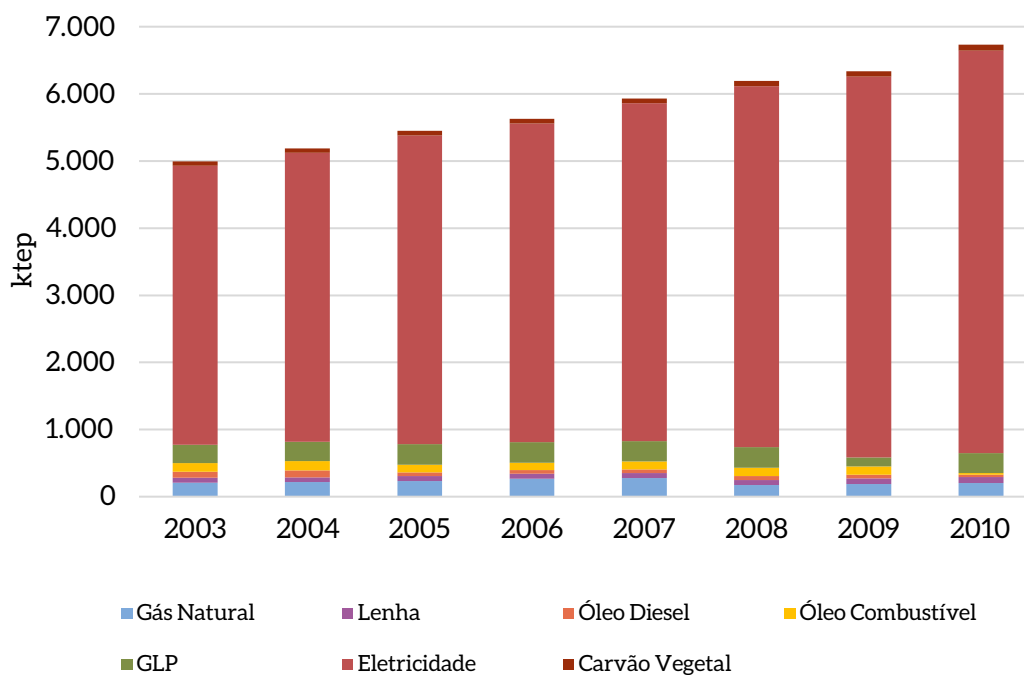


Figura 5 – Consumo de Energia do Setor Comercial e Serviços por Fonte (2003-2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2016

Em 2010, o consumo total de energia pelo setor comercial atingiu 6.731 ktep, com crescimento de 35% ao longo dos sete anos considerados. Na Figura 6, pode-se verificar que a eletricidade é a principal fonte energética utilizada pelo setor e responde por 89% do total de energia consumida.

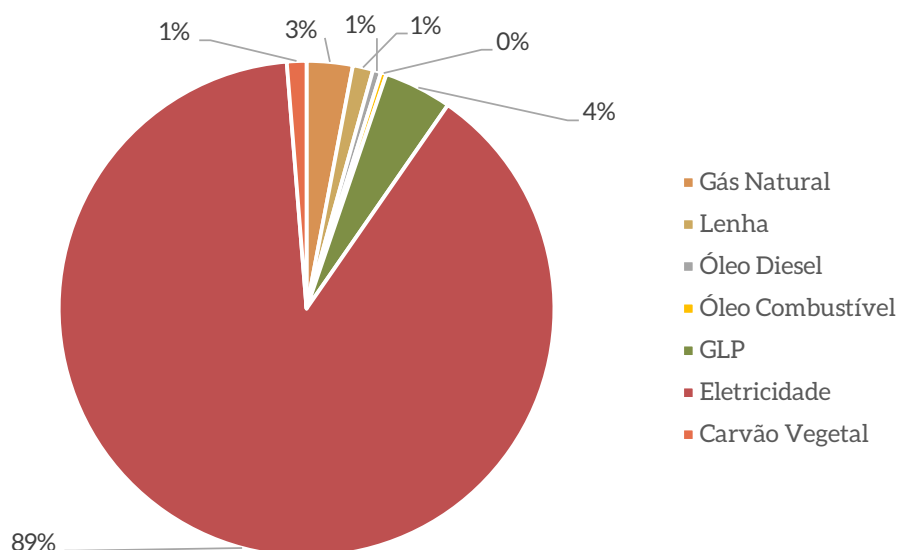


Figura 6 – Participação das Fontes Energéticas no Consumo de Energia do Setor Comercial e Serviços (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2016

A distribuição por uso, apresentada na Tabela 2, considera coeficientes de destinação informados na mais recente edição do BEU (MME, 2005) e valores do consumo final para o setor apresentados, para 2010, no BEN (EPE, 2013).

Tabela 2 – Consumo Final de Energia por Fonte e Uso no Setor Comercial e Serviços (2010 em ktep)

Fonte Energética	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Outras	Total
Gás natural	0,0	101,0	101,0	0,0	0,0	0,0	201,9
Carvão vapor	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lenha	0,0	18,5	70,4	0,0	0,0	0,0	88,9
Óleo diesel	13,2	16,3	6,2	0,0	0,0	0,0	35,6
Óleo combustível	0,0	23,3	1,3	0,0	0,0	0,0	24,6
GLP	0,0	5,4	292,5	0,0	0,0	0,0	297,8
Eletricidade	874,9	34,2	467,2	1.997,0	2.508,1	115,1	5.996,5
Carvão vegetal	0,0	0,0	86,2	0,0	0,0	0,0	86,2
Total	888,0	198,5	1.024,8	1.997,0	2.508,1	115,1	6.731,5

Fontes: Elaboração própria a partir de MME, 2005; EPE, 2013

1.2.2 EMISSÕES DE CO₂

As emissões calculadas aqui para o setor referem-se exclusivamente ao uso de energia e foram estimadas com base em fatores de emissão padronizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2006), com exceção da eletricidade – para essa fonte, foram considerados fatores de emissão médios do sistema elétrico interligado, disponibilizados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2016b) a partir de 2006, tendo sido utilizado o valor desse ano para o período 2003-2005. O resultado desse cálculo pode ser observado na Figura 7.

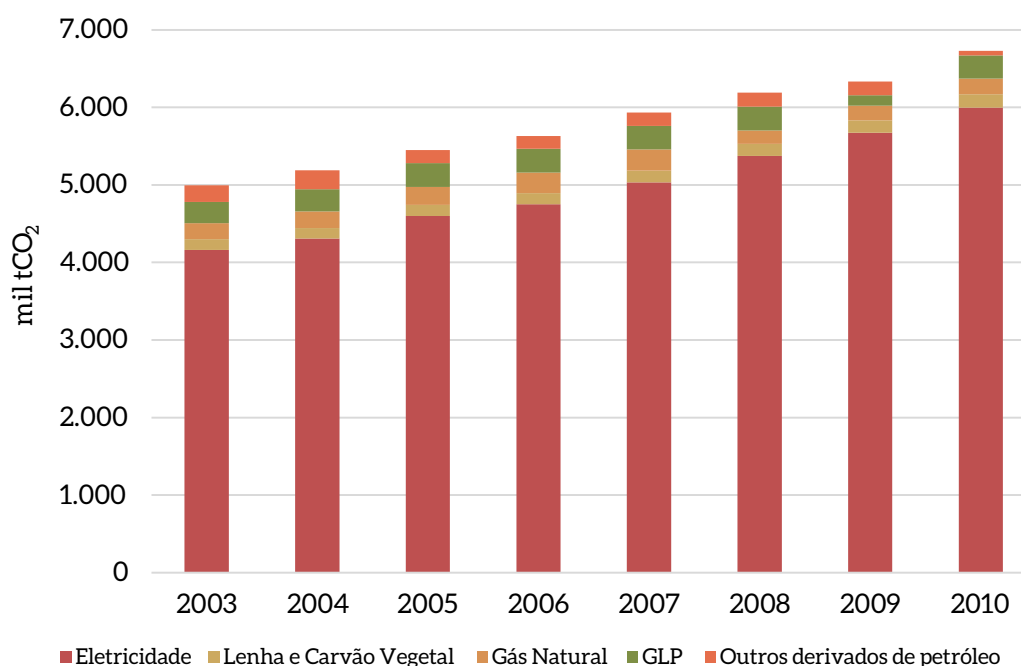


Figura 7 – Emissões de CO₂ no Setor Comercial e Serviços (2003-2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTI, 2016a; EPE, 2013; IPCC, 2006

Percebe-se grande oscilação das emissões da eletricidade em função da variabilidade da geração hidroelétrica na operação do sistema hidrotérmico brasileiro. Em 2010, ano-base deste estudo, as emissões de CO₂ foram de 6,4 milhões de toneladas, distribuídas por fontes, conforme Figura 8.

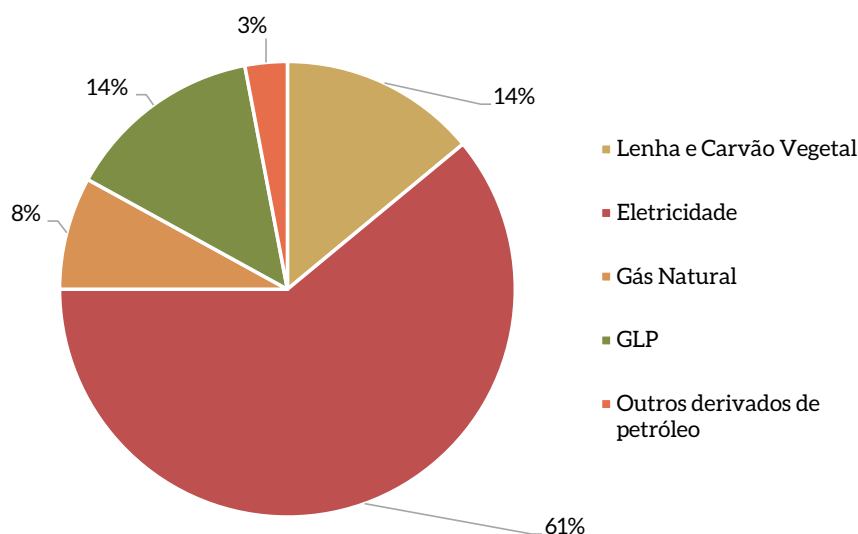


Figura 8 – Participação por Fonte Energética nas Emissões de CO₂ do Setor Comercial e Serviços (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTIC, 2016a; EPE, 2013; IPCC, 2006

1.3 SETOR PÚBLICO

O setor público considerado neste estudo corresponde essencialmente ao setor governamental em seus diferentes níveis (federal, municipal e estadual), conforme alocação do BEN. O consumo associado ao setor inclui, ainda, sistemas de iluminação pública e de saneamento e tratamento de água. Embora este trabalho inclua o consumo da iluminação pública, o consumo relativo aos serviços de saneamento e tratamento de água não será considerado, visto que foi contabilizado pelo projeto no âmbito do setor de gestão de resíduos.

1.3.1 CONSUMO DE ENERGIA

Não havendo séries estatísticas para o consumo de energia – essencialmente eletricidade – para iluminação pública e saneamento, serão abatidos dos valores indicados no BEN para o setor público os seguintes montantes, entendendo-se que o valor remanescente corresponderá exclusivamente a edificações:

- 30,9% do total, correspondendo ao consumo para saneamento (verificado em 2007), como indicado no Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF) (MME, 2011);
- 30,7% do total, correspondendo ao consumo para iluminação pública (verificado em 2008), como indicado no PNEF (MME, 2011).

Considerando as especificações acima, a série correspondente ao consumo exclusivo das edificações do setor público no Brasil é apresentada na Figura 9, onde pode ser vista a relevância da eletricidade para o setor, mesmo abatidas as parcelas de saneamento e iluminação pública.

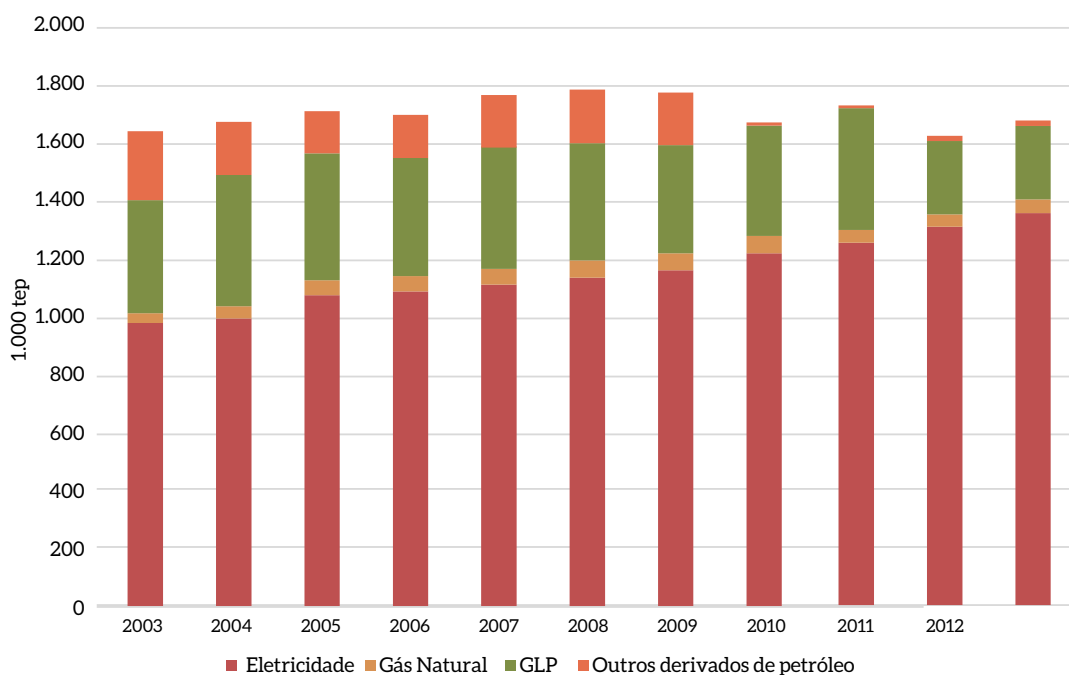


Figura 9 – Consumo de Energia das Edificações do Setor Público por Fonte (2003-2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2013

Os valores por fontes energéticas no consumo final (em ktep) e sua participação, em 2010, são apresentados na Figura 10. A eletricidade responde por 73% da energia utilizada, sendo relevante também a participação do GLP (23%).

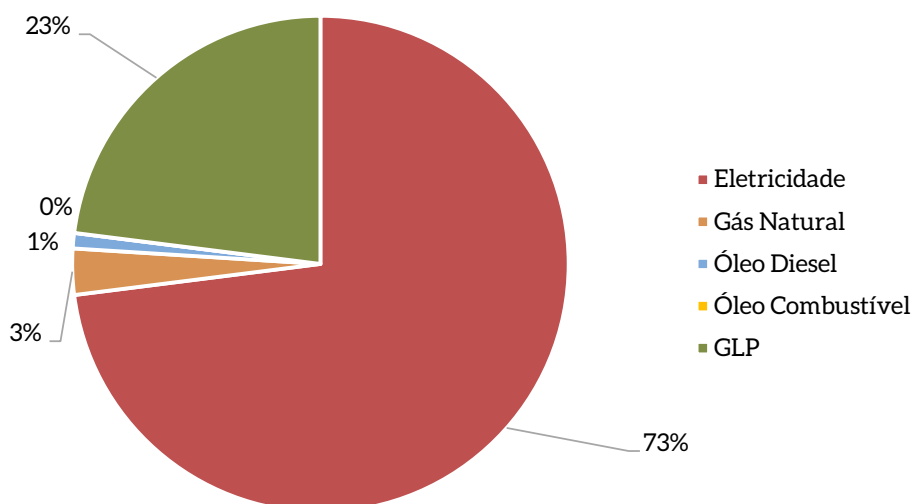


Figura 10 – Participação das Fontes Energéticas no Consumo de Energia das Edificações do Setor Público (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2013

O consumo em 2010, segundo o uso final, é apresentado na Tabela 3, considerados os coeficientes de destinação do BEU para 2004 (MME, 2005) e o consumo final apurado pelo BEN. Como no BEU o uso “força motriz” representaria 27,9% do consumo total do setor (inclusive saneamento), será feito um ajuste de forma a manter um remanescente de 5% para força motriz (valor arbitrado), sendo o restante deduzido de iluminação, de forma a serem obtidos valores exclusivamente de edificações.

Tabela 3 – Consumo Final de Energia por Fonte e Uso em Edificações do Setor Público (2010 em ktep)

Fonte Energética	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Outras	Total
Gás natural	0,0	29,9	29,9	0,0	0,0	0,0	59,8
Óleo diesel	5,0	4,5	2,1	0,0	0,0	0,0	11,6
Óleo combustível	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3
GLP	0,0	0,0	380,8	0,0	0,0	0,0	380,8
Eletricidade	61,0	3,1	26,2	219,7	886,0	24,4	1.220,4
Total	66,0	40,9	439,0	219,7	886,0	24,4	1.676,0

Fonte: Elaboração própria a partir de MME, 2005; EPE, 2013

1.3.2 EMISSÕES DE CO₂

As emissões de CO₂ originadas da atividade energética das edificações do setor público foram calculadas a partir de fatores de emissão padronizados pelo IPCC (2006) e poderes caloríficos apresentados no BEN (EPE, 2013). A Figura 11 apresenta a evolução dos valores calculados.

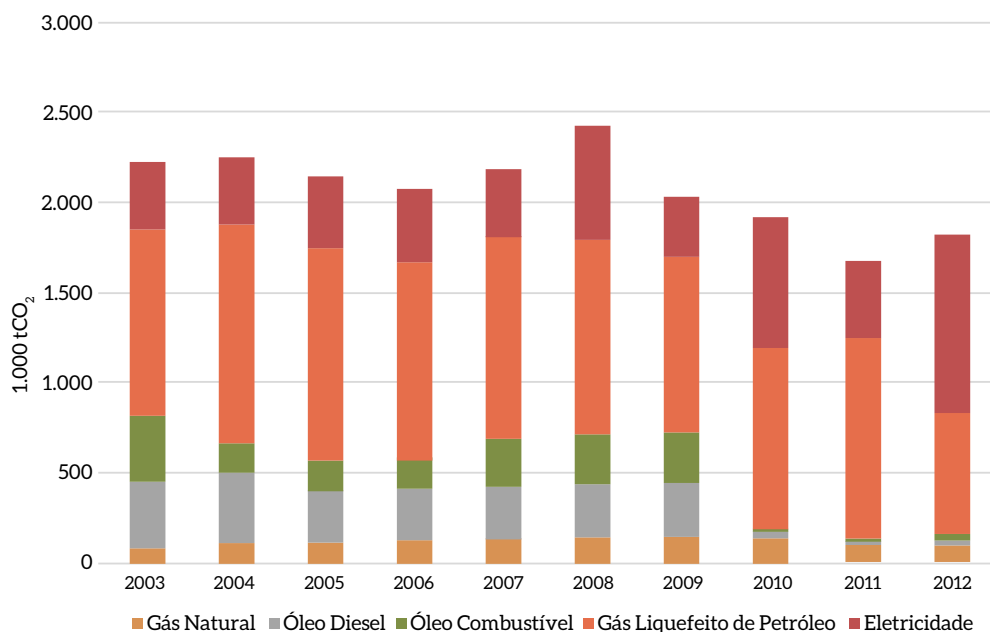


Figura 11 – Emissões de CO₂ das Edificações do Setor Público (2003-2012)

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTI, 2016a; EPE, 2013; IPCC, 2006

As emissões de CO₂ estimadas para 2010 foram de aproximadamente 1,9 milhão de toneladas. Nesse ano, o GLP foi a fonte de maior participação. Em 2012, a eletricidade passou a ser a fonte mais representativa para as emissões de GEE, o que decorreu do aumento do fator de emissão do *grid*, sobretudo em função do crescimento da geração baseada em termoeletricas a carvão e gás natural. A Figura 12 apresenta os valores e a participação das fontes emissoras em 2010.

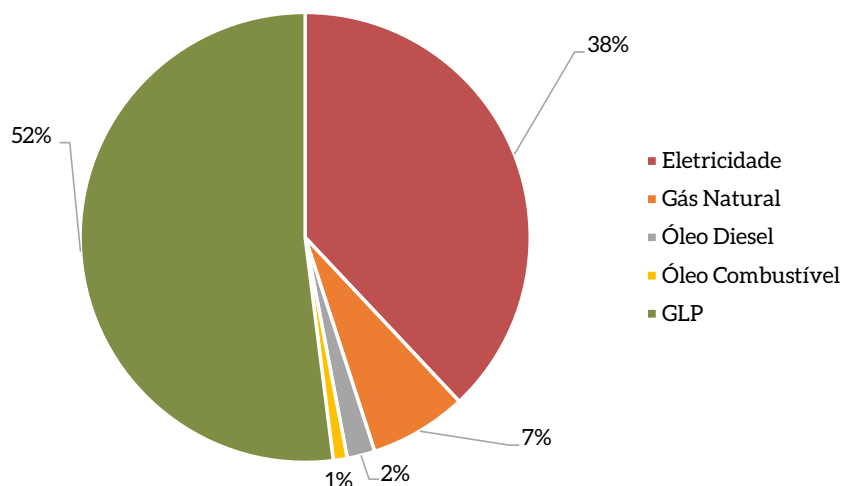


Figura 12 – Participação das Fontes Energéticas nas Emissões de CO₂ das Edificações do Setor Público (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTI, 2016a; EPE, 2013; IPCC, 2006



Caracterização tecnológica

Capítulo

2

2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Neste capítulo, é realizada a caracterização das tecnologias utilizadas nos segmentos residencial, comercial e serviços, e público, assim como as utilizadas na geração distribuída (GD). São apresentadas também as MTD, que representam as opções para a redução de consumo de energia e, consequentemente, de emissões de GEE. Essa caracterização tecnológica é de extrema importância para o cálculo dos potenciais de abatimento e custo marginal de abatimento, permitindo a construção do cenário BC, bem como para definir a linha de base (cenário REF) setorial para os diferentes usos finais no setor de edificações.

A caracterização será subdividida nos seguintes usos finais de energia: iluminação, climatização, refrigeração, cocção, aquecimento de água e outros usos. Além dessas categorias, será avaliada a GD de eletricidade por meio das fontes eólica e solar.

2.1 SETOR RESIDENCIAL, COMERCIAL E SERVIÇOS E PÚBLICO

2.1.1 ILUMINAÇÃO

2.1.1.1 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

A tecnologia usada para atender o uso da iluminação no setor de edificações é a lâmpada. Uma lâmpada é um dispositivo elétrico que transforma energia elétrica em energia luminosa e/ou em energia térmica. Embora no mercado brasileiro exista grande variedade de lâmpadas, segundo o Procel/Eletrobras (2007a), as principais tecnologias de iluminação no setor residencial são incandescente, fluorescente (tubular, compacta e circular) e dicróica (Quadro 1), sendo as lâmpadas incandescentes as mais comuns e as mais conhecidas por ser a tecnologia mais antiga (GREGGIANIN et al., 2013).

Quadro 1 – Características dos Principais Tipos de Lâmpadas

Tipo de lâmpada	Eficácia luminosa (lm/W)	Vida útil (Horas)	Potência (W)	Características gerais
Incandescente	10 a 15	750	40 a 100	Seu princípio de funcionamento se baseia na emissão de luz pela incandescência de um filamento superaquecido. Esse tipo de lâmpada tem excelente reprodução de cores, baixa eficiência luminosa e não exige equipamentos auxiliares.
Dicroica	22	2.000	20 a 50	As lâmpadas dicroicas são as mais conhecidas do grupo das halógenas, sendo que são lâmpadas incandescentes às quais se adiciona um elemento halógeno, geralmente iodo ou bromo. Essas lâmpadas tendem a gerar mais calor como consequência da sua compactação.
Fluorescente tubular	55 a 75	-	-	
Fluorescente compacta (LFC)	50 a 85	8.000 a 12.000	11 a 23	As lâmpadas fluorescentes são consideradas lâmpadas de descarga de baixa pressão, cujo funcionamento está baseado na descarga elétrica em vapores metálicos, como vapores de mercúrio ou vapores de sódio. Esse tipo de lâmpada tem boa reprodução de cores, boa eficiência luminosa. Precisa de equipamento auxiliar (reator).
Fluorescente circular	75 a 90	-	-	

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de MORISHITA, 2011; DOE, 2014a; GREGGIANIN et al., 2013

No caso da área interna de prédios comerciais e públicos, essas lâmpadas também são as mais usadas, porém, para áreas externas, usa-se outro tipo de lâmpada, como vapor de sódio, de mercúrio e metálico. No mercado brasileiro, têm se incorporado diferentes tipos de lâmpadas, objetivando a diminuição do consumo de energia elétrica para iluminação.

Conforme algumas tabelas de consumo/eficiência energética disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), podem-se caracterizar os modelos comercializados de LFC de 127 V e 220 V.

A Figura 13 mostra os modelos de LFC de 127 V e 220 V comercializados e registrados no Inmetro. Salienta-se que, no caso das LFC de 127 V, não foram levadas em consideração aquelas que já têm prazo para sair do mercado, segundo a Portaria Inmetro nº 489/2010. Nesse sentido, no caso desse tipo de lâmpadas, estão disponíveis no mercado, atualmente, 2.443 modelos autorizados, porém 2.191 não têm data para deixar de ser comercializados.

Ainda na Figura 13 percebe-se que a maioria dos modelos comercializados se encontra dentro da faixa de eficiência de 54,25 lm/W até 62,16 lm/W² e que, na faixa que poderia ser considerada como de máxima eficiência (eficiência > 70,10 lm/W), apenas se encontram 41 modelos de LFC de 220 V e 38 modelos de LFC de 127 V.

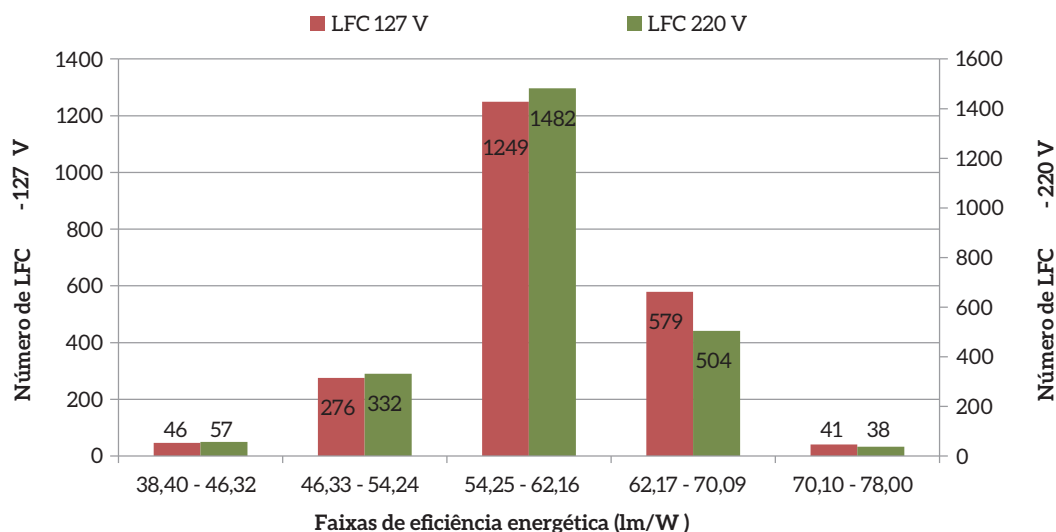


Figura 13 – Modelos de LFC 127 V e 220 V Comercializadas e Registrados no Inmetro

Fonte: Elaboração própria com dados do INMETRO, 2014

No mesmo sentido, para lâmpadas incandescentes, construiu-se a Figura 14, que mostra o número de modelos por faixas de eficiência, feitas arbitrariamente, de lâmpadas incandescentes comercializadas e registradas no Inmetro. Observa-se que a maior eficiência atingida por esse tipo de lâmpada corresponde a 12,9 lm/W, dado bem menor do que a mínima eficiência das lâmpadas LFC, que é de 38,4 lm/W.

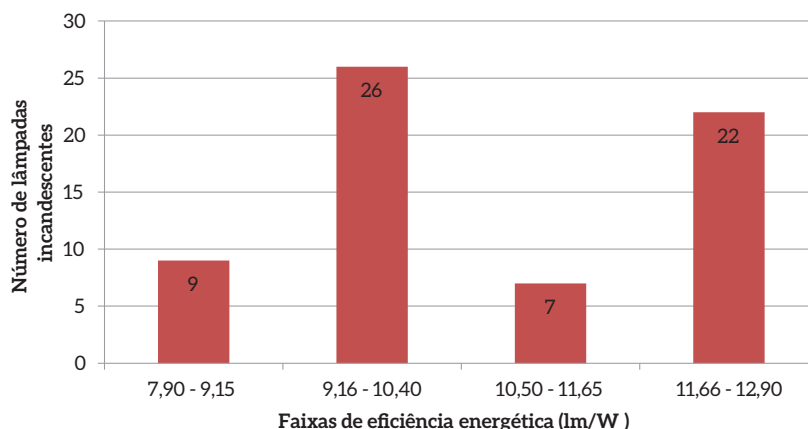


Figura 14 – Modelos de Lâmpadas Incandescentes Comercializadas e Registradas no Inmetro

Fonte: Elaboração própria com dados do INMETRO, 2014

2 Essas faixas têm sido criadas arbitrariamente, correspondendo apenas a um diagrama de frequências. Essa eficiência atende apenas às portarias e, por enquanto, não existe uma classificação de eficiência energética aplicável no caso de LFC.

2.1.1.2 MTD

Ainda existem alternativas de lâmpadas incandescentes no mercado com custos competitivos no tocante à vida útil do equipamento (EIA, 2014). A tecnologia de lâmpadas fluorescentes mostra significativo aprimoramento na eficiência em relação às lâmpadas incandescentes, enquanto se espera que as últimas tecnologias que ainda se encontram em desenvolvimento, conhecidas como *solid-state lighting* (SSL), melhorem ainda mais o nível de eficiência atingido com as lâmpadas fluorescentes.

A Figura 15 apresenta, além do histórico, o desenvolvimento esperado até 2020 das diferentes tecnologias de iluminação.

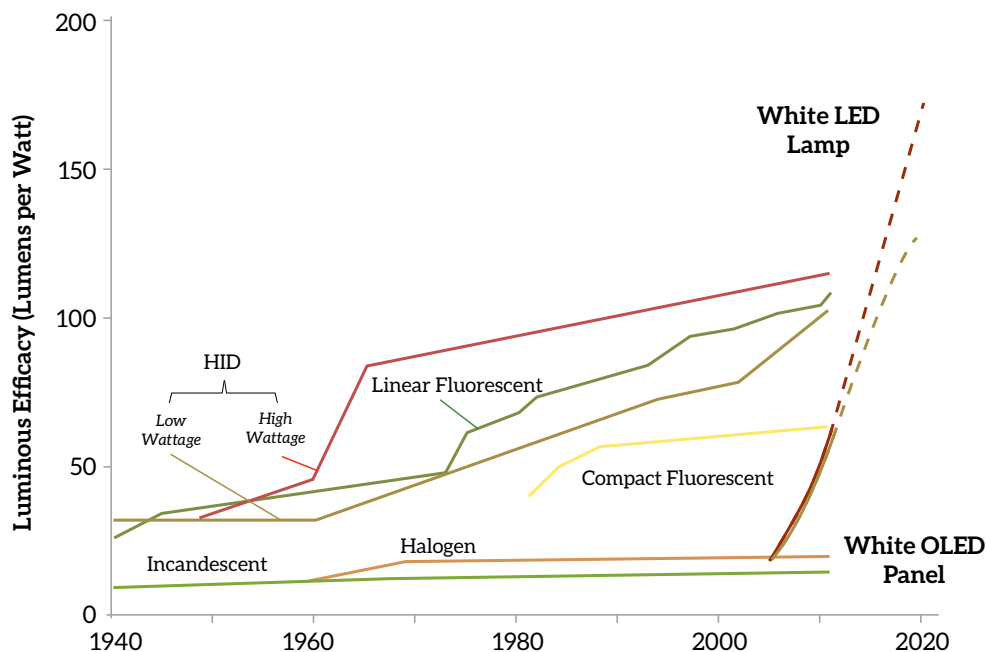


Figura 15 – Eficiência Típica de Lâmpadas e Desenvolvimento Esperado até 2020

Fonte: NAVIGANT CONSULTING INC. apud DOE, 2014b

2.1.1.2.1 TECNOLOGIA LED

Os diodos emissores de luz (LED) ou componentes eletrônicos semicondutores têm a propriedade de transformar a corrente elétrica em luz. Ao contrário das lâmpadas incandescentes, que abrangem todo o espectro de cores, as lâmpadas LED (exemplos na Figura 16) apenas produzem uma única cor, dependendo do tipo de material utilizado na sua fabricação, por exemplo, galênio, arsênio ou fósforo (VIANA et al., 2012).



Figura 16 – Lâmpadas LED

Fonte: VIANA et al., 2012

A Tabela 4 mostra o desempenho de algumas classes de lâmpadas LED. No tocante à eficiência luminosa, pode atingir até 144 lm/W, caso das lâmpadas brancas LED de cores frias. Esses tipos de lâmpadas têm tempo de vida de até 75.000 horas, o que é bastante superior, por exemplo, às lâmpadas incandescentes, que atingem entre 750 a 1.000 horas/ano. Contudo, no estudo foi utilizado um tempo de vida médio de 50.000 horas para lâmpadas LED.

Tabela 4 – Performance de Algumas Classes de Lâmpadas LED

Tipos de Lâmpadas	Eficácia luminosa (lm/W)	Radiação luminosa (lúmens)	Potência (watts)	Tempo de vida médio (horas)
LED white package (cool)	144	144	1	50.000
LED white package (warm)	111	111	1	50.000
LED A19 lâmpada (warm white)	93	910	9,3	25.000
LED PAR38 lâmpada (warm white)	74	1	13,5	25.000

Fonte: Elaboração própria a partir de DOE, 2014b

Os preços das luminárias são usualmente comparados em unidades monetárias/lúmen. A Tabela 5 mostra os preços de algumas classes de lâmpadas. Considerando a unidade normalizada (US\$/1.000 lm), observa-se que o preço das lâmpadas LED é 12 vezes maior do que o preço das lâmpadas halógenas e cerca de três vezes o preço de uma lâmpada compacta fluorescente regulável. Contudo, espera-se que o preço das lâmpadas LED diminua rapidamente até atingir cerca de 25% do seu preço atual em 2020 (IEA, 2013a; DOE, 2014b).

Tabela 5 – Preços de Várias Classes de Lâmpadas (US\$/1.000 lm)

Tipo de lâmpada	Preço (US\$/1.000 lm)
Lâmpada halógena (A19 43W; 750 lúmens)	2,5
FLC (13W, 800 lúmens)	2
FLC (13W, 800 lúmens regulável)	10
Lâmpada fluorescente e sistema de balastro (F32T8)	4
Lâmpada LED (A19 60W; 800 lúmens regulável)	30
Luminária OLED	1.700

Fonte: Elaboração própria a partir de DOE, 2014b

A Figura 17 mostra a variação prevista do preço em decorrência do aprimoramento da eficiência das lâmpadas até 2050. Em particular, observa-se que incandescentes/halógenas e LFC já atingiram a máxima eficiência possível, enquanto, no caso de lâmpadas LED, espera-se que até 2040 se consiga uma eficiência de aproximadamente 200 lúmens/watt a um preço equivalente às lâmpadas LFC e incandescentes atuais.

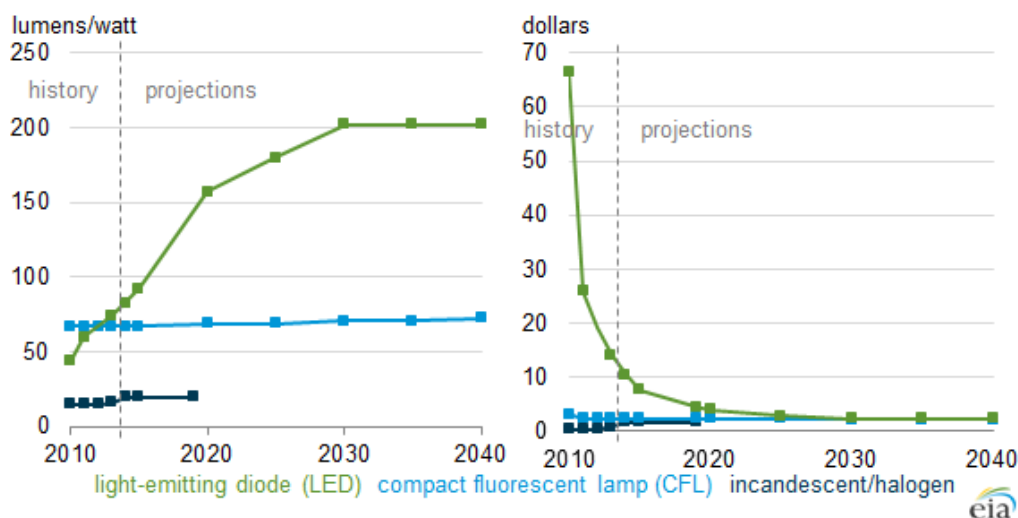


Figura 17 – Aprimoramento de Eficiência de Lâmpadas versus Preço

Fonte: EIA, 2014a

2.1.1.2.2 TECNOLOGIA OLED

Embora ainda não tenha chegado a seu máximo desenvolvimento, autores como Thejokalyani e Dhoble (2014) indicam que essa tecnologia é uma candidata potencial no uso de iluminação, sendo que a luz com esse tipo de tecnologia se produz de forma similar à da tecnologia LED, mas a camada de emissão eletroluminescente é um filme orgânico que emite luz em resposta a uma corrente elétrica. Contudo, essa tecnologia apenas vem se expandindo para *smartphone* e *tablet*, enquanto o impacto no custo das luminárias com essa tecnologia ainda não é evidente (DOE, 2014b). A eficácia e o tempo de vida dessa tecnologia são observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Eficácia e Tempo de Vida da Tecnologia OLED para Luminárias

Fabricante	Eficácia (Lúmen/Watt)	Tempo de vida (horas)
Philips	16,7	10.000
Osram	35	10.000
Lumiotec	40	20.000
Panasonic	30	10.000
Konica	45	10.000

Fonte: Elaboração própria a partir de HAMER, 2013

Segundo DOE (2014b), o custo de luminárias com essa tecnologia estava em torno de US\$ 2.500 a US\$ 25.000 por 1.000 lm em 2011. Essa faixa é bastante ampla, indicando que a tecnologia ainda tem muito que percorrer para estar totalmente desenvolvida.

Embora os avanços tecnológicos em tecnologias de iluminação tenham sido importantes nos últimos anos, no Brasil, ainda não se encontram disponíveis tais tecnologias. No mercado brasileiro, as lâmpadas com maior eficiência reportadas no Inmetro³ são as fluorescentes espirais e compactas. A Tabela 7 mostra as características das lâmpadas que correspondem às de maior eficiência.

Tabela 7 – MTD de Iluminação Reportadas no Inmetro

Tipo	Modelo	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Eficiência Energética (lm/W)	Equiv. Lâmp. Incandescente (W)	Temp. de Cor (K)	Preço (R\$)
Espiral	7W 127 V 2.700 K Espiral Mini-Moon	7	563	78,0	40	2.700 (BM)	12,5
Espiral	12W 127 V 2.700 K Espiral Mini-Moon	12	903	78,0	70	2.700 (BM)	26
Compacta	CFL 3U 24 A/220 V	24	1.853	77,2	130	2.700 K	12

Fonte: Elaboração própria com dados de INMETRO (2014)

2.1.2 CLIMATIZAÇÃO

As vendas de equipamentos de ar-condicionado têm crescido significativamente nos últimos anos. Em 1998, estimavam-se vendas anuais de 1,11 milhão de unidades (CARDOSO et al, 2012). Em 2013, as vendas foram estimadas em 4,35 milhões de unidades (18% tipo janela e 82% tipo *split*) (ABRAVA, 2014b).

3 No Inmetro, ainda não se encontram produtos registrados de tecnologia LED.

O incremento das vendas de equipamentos de ar-condicionado no setor residencial pode ser assim explicado: i) crescimento da renda das famílias com obtenção de facilidades de crédito; ii) elevação de padrão de vida das classes C e D; e iii) produção na Zona Franca de Manaus, o que favorece a indústria nacional e o abastecimento do mercado (ABRAVA, 2014b).

No caso do Brasil, por ser um país tropical com temperaturas mais altas, a climatização está mais focada na produção de frio. Embora na região Sul o aquecimento térmico também seja utilizado em pequena escala, a climatização como serviço energético será focada na produção de frio (aparelhos de ar-condicionado).

2.1.2.1 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

De acordo com as classificações apresentadas pela NBR 10.142/1987, os principais sistemas de ar-condicionado de expansão direta⁴ são apresentados a seguir. A listagem inclui equipamentos de pequeno porte, utilizados em residências e/ou pequenos estabelecimentos comerciais, e equipamentos de grande porte, utilizados em estabelecimentos com cargas de condicionamento muito altas.

- a) Janela ou parede – esse tipo de equipamento deve ser instalado embutido na parede (pouca flexibilidade), é compacto, pouco silencioso e de fácil manutenção. Tem capacidade limitada à faixa de 6.000 a 30.000 BTU/h (0,5 a 2,5 TR⁵);
- b) Portátil – esse é um aparelho que não precisa de instalação específica para ar-condicionado. Caracteriza-se pela praticidade de utilização em qualquer ambiente que se queira climatizar. Também assegura a renovação de ar;
- c) *Split* – condicionador de ar do tipo *split* pode ser fixo ou móvel e tem duas partes distintas: uma é instalada dentro do ambiente que se deseja climatizar (evaporador) e a outra, do lado de fora, onde ficam o condensador e o compressor. Conta com sistema de filtragem de ar e baixo nível de ruído no ambiente. Sua capacidade gira em torno de 7.000 e 60.000 BTU/h (0,5 a 5 TR);
- d) Sistemas centrais – caracterizam-se por maiores capacidades, se comparados aos modelos anteriores, e são utilizados para climatizar grandes ambientes ou diversos ambientes simultaneamente. São silenciosos e em geral necessitam de recinto especial para sua instalação;
- e) Equipamentos *self-contained* – esse tipo de equipamento é utilizado em sistemas de grande porte e apresenta diferentes configurações, com compressor e evaporador montados em uma única unidade e condensador incorporado (a ar ou água) ou remoto. Equipamentos *self-contained* são montados em locais abrigados, podendo ser instalados diretamente no ambiente a condicionar. A capacidade típica para uma unidade é de 5 TR a 50 TR;
- f) Equipamentos *rooftop* – esses equipamentos de grande porte assemelham-se a unidades *self-contained* com condensador incorporado, mas sua construção é destinada à montagem não abrigada, permanecendo na cobertura da edificação. A capacidade desse equipamento também se situa entre 5 TR e 50 TR;

4 Sistemas por expansão direta são aqueles em que o ar é resfriado (ou aquecido) por troca térmica diretamente com o fluido refrigerante, sendo a tecnologia usual para equipamentos de pequeno porte. Sistemas por expansão indireta utilizam um fluido intermediário como água gelada, como no caso de *chillers*.

5 TR (tonelada de refrigeração) é a unidade usual para indicação da potência térmica de equipamentos de maior porte e corresponde a 3.024 kcal/h (ou 12.000 BTU/h).

g) Sistemas de água gelada – também de grande porte, esses sistemas consistem em diferentes equipamentos, especificamente: resfriador de líquido (*chiller*),⁶ bombas para circulação de água gelada e climatizadores tipo *fan-coil* (ventilador associado a serpentina de água gelada, onde se realiza a troca térmica para o ar insuflado ao ambiente). Os sistemas de água gelada podem ser classificados de diferentes maneiras, sendo usualmente considerados:

- Meio de condensação a ar ou água (com emprego de torres de resfriamento);
- Tipo de compressor empregado no resfriador: alternativo (até 200 TR), parafuso (100 TR a 750 TR) ou centrífugo (200 TR a 2.000 TR).

Os compressores centrífugos oferecem a melhor eficiência energética para carregamentos próximos ao máximo, enquanto os do tipo parafuso permitem desempenho em cargas reduzidas. Compressores alternativos vêm sendo cada vez menos utilizados por causa do barateamento dos compressores parafuso.

Em 2009, foram iniciadas as etiquetagens e a concessão do Selo Procel aos condicionadores de ar tipo *split* piso-teto e, pela primeira vez, revisada a tabela de classificação energética de equipamentos *split*.

Em 2011, a Portaria Interministerial MME, MCTI e MDIC nº 323 aprovou o Programa de Metas da Lei de Eficiência Energética para condicionadores de ar dos tipos janela e *split* (MME, 2012). Assim, a partir de 1º de janeiro de 2012, novos níveis de eficiência energética, para os condicionadores do tipo *split hi-wall*, passaram a vigorar de forma compulsória no Brasil.

Em 1º de janeiro de 2013, entraram em vigor os índices mínimos de eficiência energética válidos para equipamentos tipo *split cassette* e piso-teto. Segundo a referida portaria, o nível mínimo do coeficiente de eficiência energética (W/W) para condicionadores de ar tipo *split* é de 2,6.

Tabela 8 – Níveis Mínimos do Coeficiente de Eficiência Energética para Condicionadores de Ar Tipo Janela

Capacidade de Refrigeração - CR				
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
Kj/h	CR ≤ 9.495	9.496 ≤ CR ≤ 14.769	14.770 ≤ CR ≤ 21.099	CR ≥ 21.100
BTU/h	CR ≤ 9.000	9.001 ≤ CR ≤ 13.999	14.000 ≤ CR ≤ 19.999	CR ≥ 20.000
W/W	≥ 2,68	≥ 2,78	≥ 2,45	≥ 2,30

Fonte: Elaboração própria a partir de MME (2012)

A Figura 18 apresenta o coeficiente de eficiência energética de equipamentos de ar-condicionado disponíveis no mercado brasileiro e os níveis de eficiência correspondentes à etiquetagem, de acordo com o PBE.

⁶ Os *chillers* (resfriadores de líquido) são dispositivos de resfriamento de água ou outro fluido intermediário (em vez de ar) para uso em grandes instalações.

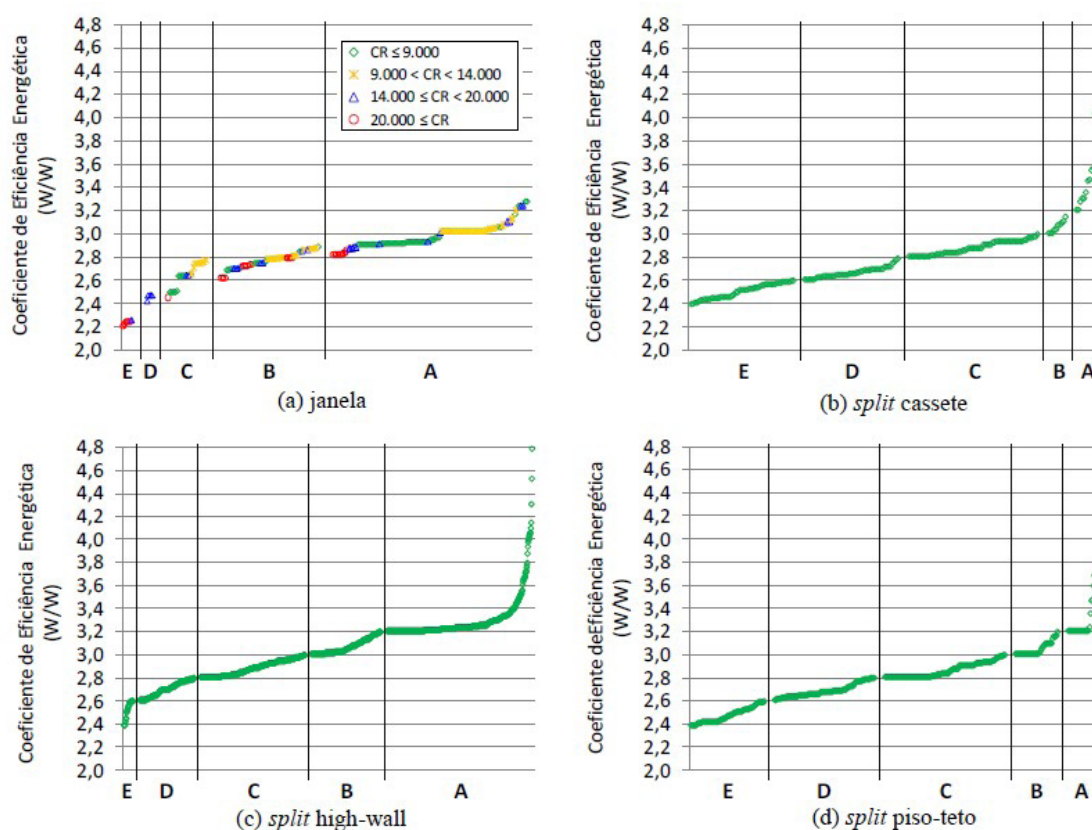


Figura 18 – Coeficiente de Eficiência Energética dos Condicionadores de Ar Aprovados pelo PBE

Fonte: PEREIRA et al., 2013

Nota: (a) tipo janela; (b) split cassette; (c) split high-wall; e (d) split piso-teto

CR é a capacidade de refrigeração do condicionador de ar em BTU/h

Além do uso de equipamentos de ar-condicionado tipo *split* e janela, comumente utilizados em residências, sistemas típicos de ar-condicionado de maior porte utilizam equipamentos tipo *rooftop* e *self-contained*, assim como sistemas centralizados de expansão indireta com água gelada (padrão). Cabe destacar que instalações comerciais e do poder público também utilizam, em alguns casos, condicionadores tipo *split* e janela para climatização.

No que diz respeito a equipamentos de grande porte, utilizados em instalações comerciais ou industriais, ainda não existe no Brasil um sistema de etiquetagem de acordo com a eficiência energética dos equipamentos (INMETRO, 2014). De acordo com dados do Departamento de Energia Americano (DOE, 2014a), as eficiências médias de linha de base para sistemas comerciais são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Eficiência de Equipamentos Convencionais de Ar-condicionado para Setores Comerciais

Tipo de Equipamento (Capacidade)	Tipo	Eficiência
Comercial menor (11 a 20 ton.)	Condicionador de ar tipo <i>rooftop</i>	10,8 EER
Comercial maior (>300 ton.)	<i>Chiller</i> (água gelada, deslocamento positivo)	0,62 kW/t

Fonte: Elaboração própria a partir de DOE, 2014a

2.1.2.2 MTD

Para avaliar as melhores tecnologias disponíveis, fez-se inicialmente um *benchmarking* com as melhores eficiências de aparelhos de ar-condicionado comercializados em outros países. Nesse sentido, observa-se tendência crescente nas eficiências dos *splits*, nos últimos anos, na China, na União Europeia, no Japão e nos Estados Unidos. No Japão, o *energy efficiency ratio* – EER (traduzido em português como razão de eficiência energética) dos equipamentos mais eficientes cresceu de 6,38 a 6,67 entre 2009 e 2011, sendo este o maior valor reportado (CLASP, 2011).

Por outro lado, os equipamentos de janela (unitários) manufaturados na União Europeia, com capacidade menor que 12 kW, reduziram o *coefficient of performance* – COP (traduzido para coeficiente de performance) de 4,17 COP em 2005 para 3,07 COP em 2011. Segundo CLASP (2011), isso sugere que muitos fabricantes de equipamentos de alta eficiência tipo-janela têm reduzido suas ofertas com o objetivo de concentrar esforços no crescente segmento de mercado de equipamentos *split*.

Percebe-se que os condicionadores tipo *split* internacionais alcançam eficiências muito superiores aos melhores equipamentos brasileiros (Figura 19). O equipamento mais eficiente no Brasil, avaliado pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), apresenta coeficiente de eficiência energética de 4,79 W/W (PEREIRA et al., 2013), enquanto a melhor tecnologia disponível para o setor residencial é um equipamento *split* de 6,67 W/W, que é o *benchmarking* no Japão.

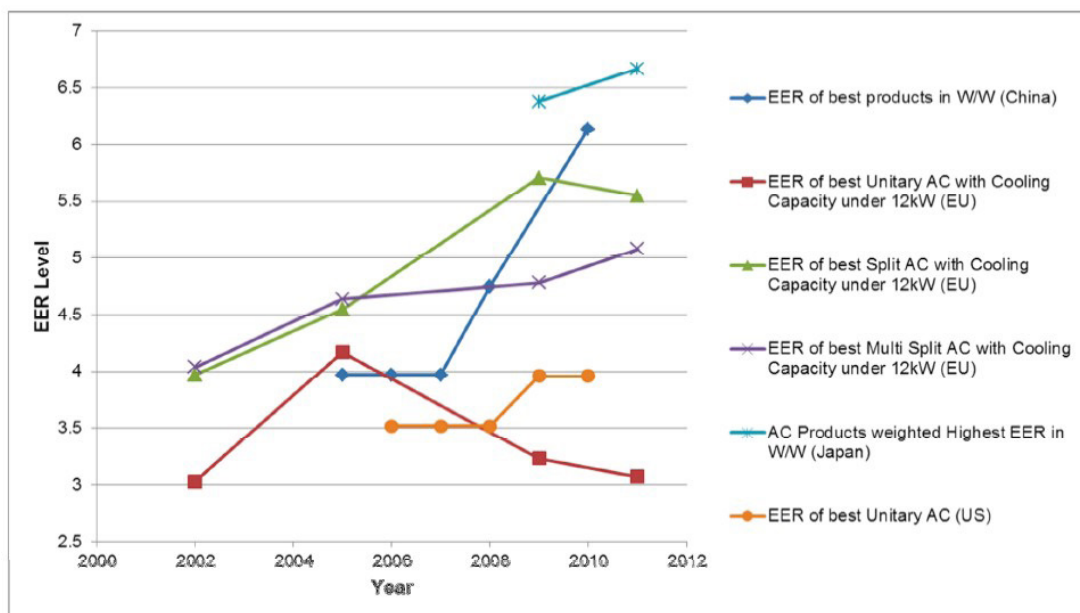


Figura 19 – Tendências de EER nos Equipamentos Mais Eficientes de Ar-condicionado

Fonte: CLASP, 2011

2.1.3 REFRIGERAÇÃO

Os refrigeradores e congeladores (*freezers*), também conhecidos como eletrodomésticos frios (*cold appliances*), são utilizados para preservação de alimentos e bebidas mediante resfriamento ou congelamento. Como essa é uma necessidade básica, a maioria dos domicílios está equipada com esses equipamentos. Nos países industrializados, um domicílio médio tem mais de um eletrodoméstico frio e, nos países em desenvolvimento, a posse desses equipamentos vem crescendo rapidamente.

Esses eletrodomésticos podem ser definidos por dois parâmetros: o volume (expresso normalmente em litros) ou o número de compartimentos e o desempenho de resfriamento ou congelamento relacionado à temperatura mínima a ser mantida dentro dos diferentes compartimentos (BARTHEL, 2012).

Os eletrodomésticos frios estão divididos em três categorias:⁷ refrigeradores, congeladores e combinados (refrigerador e congelador em um equipamento com portas externas separadas).

No Brasil, as informações sobre equipamentos da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio – PNAD 2012 (IBGE, 2012b) apresentam apenas as categorias geladeiras e *freezers*. No Censo 2010 (IBGE, 2011), em equipamentos por domicílio, só se encontra discriminada a categoria geladeira.

⁷ Neste estudo, serão adotadas terminologias utilizadas pelo Inmetro no PBE e pelo IBGE em suas pesquisas, ou seja, resfriadores correspondem a geladeiras e congeladores a *freezers*.

2.1.3.1 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Os primeiros equipamentos a receberem o Selo Procel em 1995 foram refrigeradores de uma porta, combinados e congeladores verticais. Em 2001, foi promovido um estudo em que a avaliação da eficiência energética de refrigeradores e *freezers* passou a ser calculada pela relação entre o consumo de um dado aparelho e o consumo padrão dos diversos aparelhos comercializados naquele ano. Estabeleceu-se, portanto, uma linha de base para cada categoria, a partir da qual pode-se avaliar a evolução da eficiência energética de cada categoria. Em 2007, foi publicada a Portaria Interministerial nº 362, que aprovou a regulamentação específica de refrigeradores e *freezers*, em atendimento à Lei de Eficiência Energética.

Em 2011, a Portaria Interministerial nº 326 aprovou o programa de metas da Lei de Eficiência Energética para refrigeradores e congeladores. Assim, a partir de 1º de janeiro de 2012, novos níveis máximos de consumo de energia passaram a vigorar de forma compulsória no Brasil (Tabela 10), considerando como data-limite de comercialização por atacadistas e varejistas o dia 31/12/2013.

Tabela 10 – Níveis Máximos de Consumo (C/Cp) para Refrigeradores e Congeladores

Equipamento	C/Cp
Frigobar	1,113
Refrigerador	1,144
Refrigerador <i>frost-free</i>	1,174
Combinado	1,132
Combinado <i>frost-free</i>	1,131
Congelador vertical	1,148
Congelador vertical <i>frost-free</i>	1,158
Congelador horizontal	1,162

Fonte: Elaboração própria a partir de MME, 2012

A Figura 20 apresenta o consumo de energia anual (kWh/ano) por volume (litros) dos refrigeradores no mercado brasileiro e a etiquetagem estabelecida para estes, segundo o PBE.

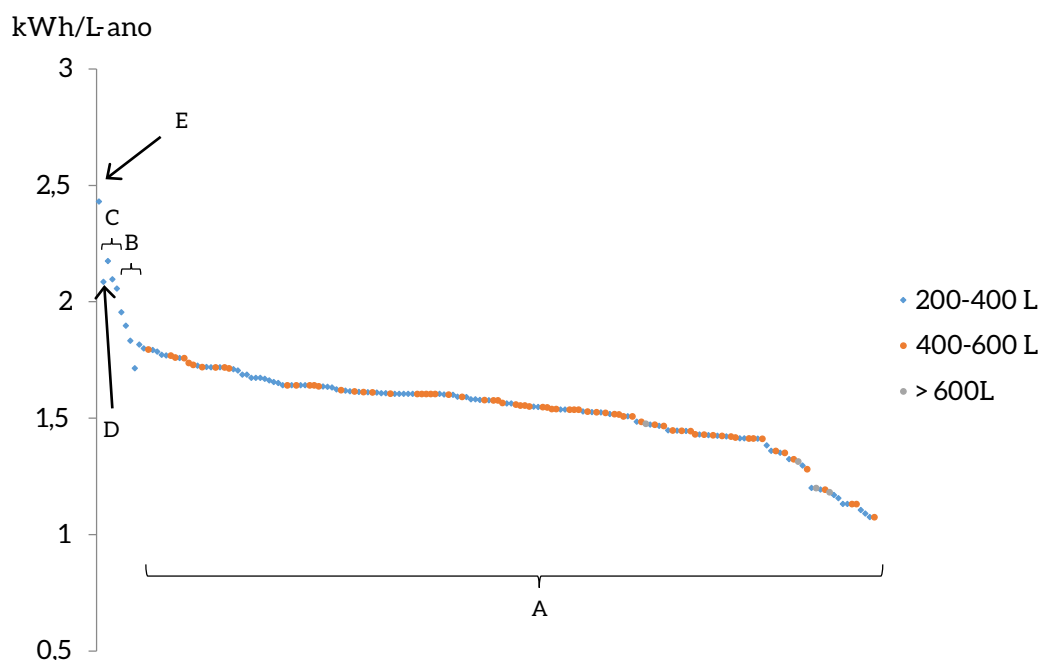


Figura 20 – Consumo de Energia por Unidade de Volume dos Refrigeradores no Mercado Brasileiro segundo Faixa de Classificação do PBE

Fonte: Elaboração a partir de INMETRO, 2014

Na Tabela 11, são apresentados os modelos utilizados por Melo e Jannuzzi (2013) para estimar o consumo de energia de linha base para refrigeradores equivalentes coletados da pesquisa nacional de Eletrobras-Procel (2007). Os dados de 49 modelos de refrigeradores de oito diferentes fabricantes foram utilizados para estabelecer os três modelos equivalentes.

Tabela 11 – Modelos Equivalentes Tomados para Representar os Refrigeradores no Brasil

Modelo Equivalente	Participação de mercado no Brasil (%)	Consumo base (kWh/ano)	Modelo de eficiência energética Opções assumidas (V e C)*
Uma porta 201-300 L Procel etiqueta C	33	326	Refrigerador Europa, 2 Star V=204 L; C=335 kWh/ano
Uma porta 301-400 L Procel etiqueta A	25	483	Refrigerador, Brasil, 1 Star V=320 L; C= 360 kWh/ano
<i>Frost-free combinado</i> 301-400 L Procel etiqueta A	14	580	Refrigerador, Europa, 4 Star V= 355 L; C=591 kWh/ano

Nota: * V=Volume; e C= Consumo de energia por ano

Fonte: Elaboração própria a partir de MELO; JANNUZZI, 2013

Os *freezers* ou congeladores também são contemplados na Portaria Interministerial nº 326/2011. Em 2005, estes representaram em média 5% do consumo de energia no setor residencial brasileiro (ELETROBRAS-PROCEL, 2007). Nesse ano, 52,8% dos *freezers* estavam concentrados na faixa entre seis e dez anos.

Na Figura 21 e na Figura 22, são apresentados os consumos de energia por unidade de volume dos *freezers* verticais e horizontais, respectivamente, para diferentes tipos de etiquetas do Selo Procel. Pode-se observar que a maioria de equipamentos se encontra com etiqueta A. Ainda, os equipamentos com maior rendimento se encontram na faixa de 200-300 L para *freezers* verticais e 200-400 L para *freezers* horizontais.

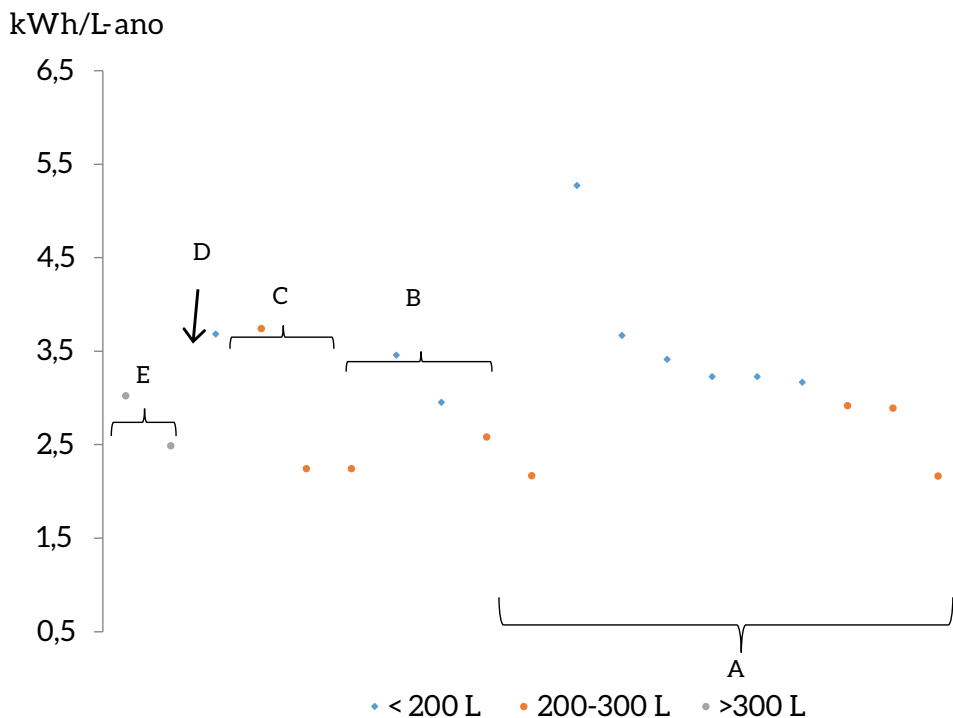


Figura 21 – Consumo de Energia por Unidade de Volume dos Congeladores Verticais no Mercado Brasileiro segundo Faixa de Classificação do PBE

Fonte: Elaboração a partir de INMETRO, 2014

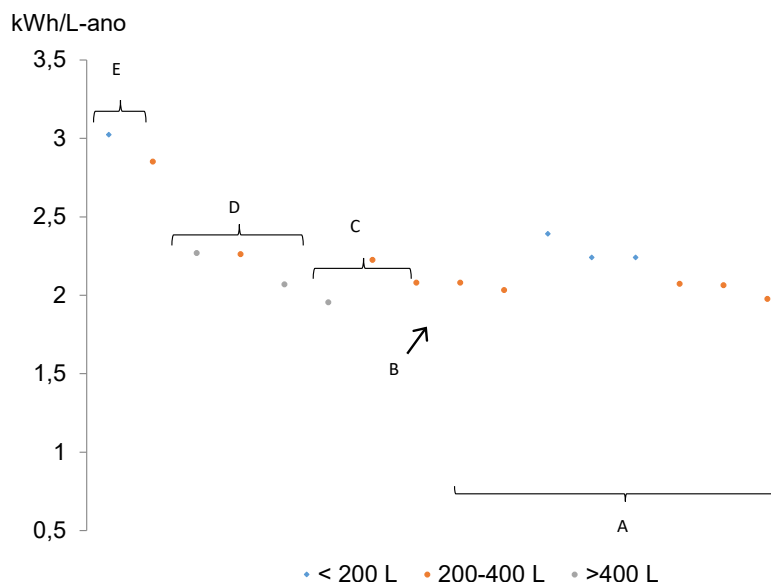


Figura 22 – Consumo de Energia por Unidade de Volume dos Congeladores Horizontais no Mercado Brasileiro segundo Faixa de Classificação do PBE

Fonte: Elaboração a partir de INMETRO, 2014

2.1.3.2 MTD

Para definir as MTD para os refrigeradores, podem-se utilizar aqueles selecionados por três programas: o Energy Star Most Efficient (ENERGY STAR, 2014a), do governo dos EUA; a etiquetagem A+++, do programa de etiquetagem da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2014); e refrigeradores do mercado brasileiro com etiquetagem A do PBE do Procel. Estes são ilustrados na Figura 23, para geladeiras.

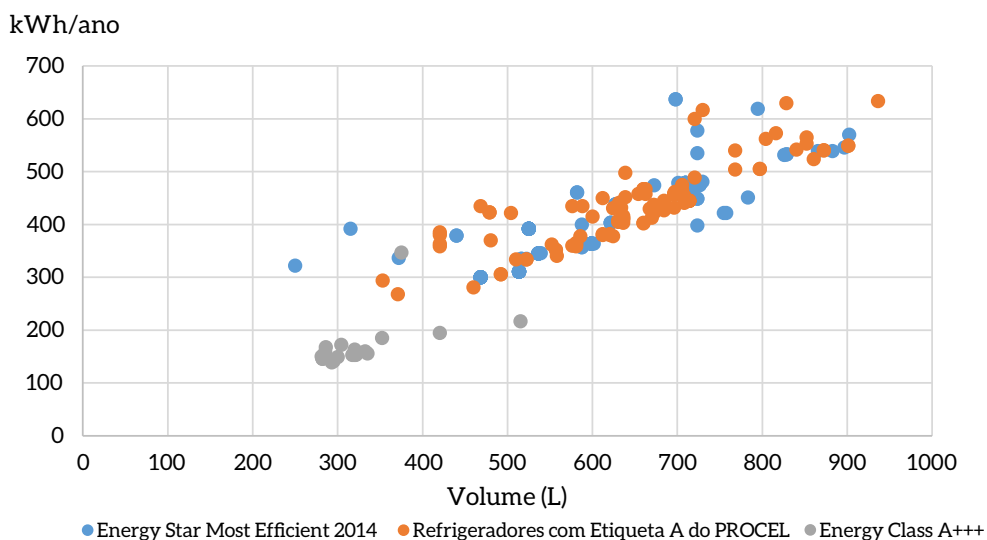


Figura 23 – Consumo de Energia Anual versus Capacidade dos Refrigeradores Energy Star Most Efficient, A+++ da União Europeia e etiqueta A do Procel

Fonte: ENERGY STAR, 2014a; TOPTEN.EU, 2015; INMETRO, 2014

Não existe classificação Energy Star Most Efficient para *freezers*. Para efeito de comparação com outras categorias de desempenho superior, foram selecionados *freezers* com a etiquetagem Energy Star com consumo de energia específica menor que 1,2 kWh/L. A Figura 24 mostra esses resultados incluindo a etiquetagem A+++, da União Europeia, a Energy Star, e os produtos com etiqueta A, do Inmetro.

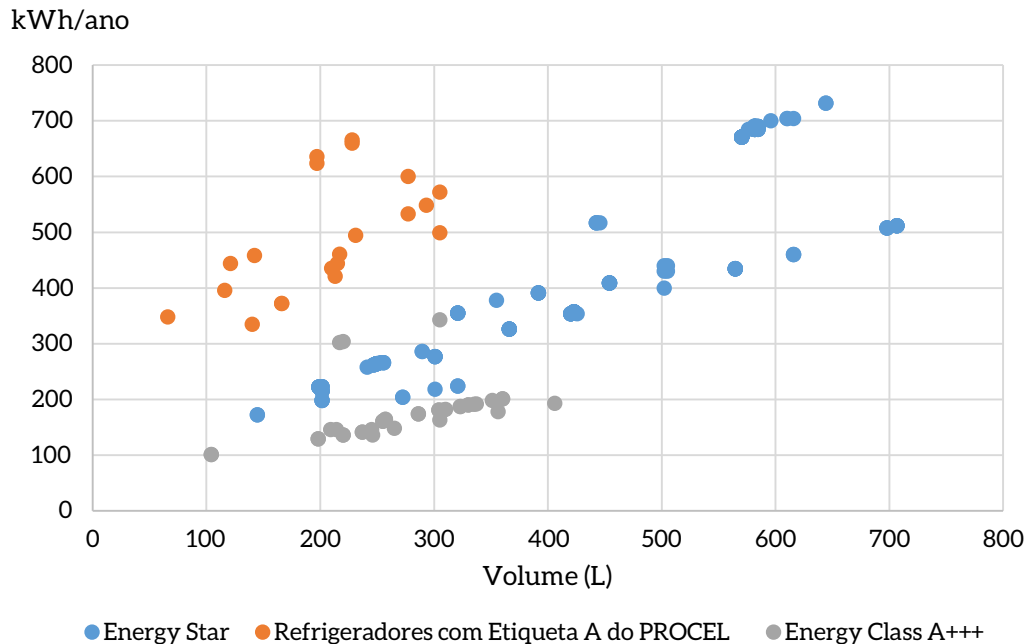


Figura 24 – Consumos de Energia Anual versus Capacidade dos *Freezers* Energy Star, A+++, da União Europeia, e etiqueta A, do Procel

Fonte: ENERGY STAR, 2014a; TOPTEN.EU, 2015; INMETRO, 2014

2.1.4 Cocção

Para a cocção de alimentos, as principais fontes utilizadas são GLP,⁸ gás natural, lenha e carvão vegetal. Para esse fim, assegurada sua disponibilidade, a opção de uso por determinada fonte energética tem forte correlação com a renda dos consumidores, a posse de equipamentos e seus hábitos de consumo. Segundo a PNAD 2012, 98,7% dos domicílios brasileiros têm fogão, sendo que a posse média desse equipamento cresceu em 1% no período 2003 a 2012.

Com relação aos fogões presentes nos domicílios brasileiros, cabem algumas considerações a respeito de sua eficiência. Nesse sentido, o PBE tem por objetivo informar os consumidores de forma a lhes permitir avaliar e otimizar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos, selecionar produtos de maior eficiência em relação ao consumo e melhor utilizar eletrodomésticos, possibilitando economia nos gastos com energia.

⁸ O Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Gás Liquefeito de Petróleo (Sindicagás) promove o termo “gás LP” para designar o produto. Neste estudo, será mantida a designação original “GLP”.

A publicação da Portaria Inmetro nº 73, de 5 de abril de 2002 (MDIC, 2002), tornou compulsória a etiquetagem de fogões e fornos a gás. Dentre os benefícios alcançados, destacam-se redução do consumo médio de gás e aumento da segurança do consumidor. Desde os primeiros ensaios realizados, a etiquetagem foi responsável por aumento de 20% na eficiência energética de fornos e fogões, reduzindo, assim, o consumo de gás e, conseqüentemente, o gasto com o gás no orçamento doméstico. A etiquetagem compulsória dos fogões e *cooktops*⁹ implica economia de até três botijões de GLP por domicílio por ano e redução anual de, aproximadamente, 450 mil toneladas de GLP por ano no Brasil.

Nesse sentido, o programa de etiquetagem de fogões e aquecedores estabelece critérios e normas a fim de estimular a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico em busca da eficiência energética. Atualmente, 679 modelos de fogões e *cooktops* comercializados no país apresentam uma etiqueta que os classificam segundo sua eficiência. Cerca de 56% desses equipamentos já atingiram a faixa de eficiência mais alta (faixa A de eficiência) e têm o Selo Conpet.¹⁰

No Brasil, a evolução do perfil de demanda para cocção de alimentos (utilizando como *proxy* a despesa com gás domiciliar – GLP e gás natural) sofreu alterações significativas nos últimos anos. Segundo a Pesquisa de Orçamento Familiar – POF 2008-2009 –, o gasto médio mensal do país atingiu R\$ 2.763,47, em que o peso de um dos principais grupos de consumo nas despesas familiares – alimentação – teve queda acentuada, passando de 33,9% (ENDEF 1974/1975) para 20,8% (POF 2002/2003) e, finalmente, para 19,8% (POF 2008/2009). Analogamente, a despesa total com gás doméstico (GLP ou gás natural) passou de 1,4% (POF 2002/2003) para 1,0% (POF 2008/2009). Isso conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Participação dos Gastos com Alimentação e Gás Domésticos nas Despesas das Famílias Brasileiras

Classes de rendimento monetário e não monetário	Despesa com alimentação no total dos gastos com consumo (%)		Despesa com gás doméstico no total dos gastos com consumo	
	2002/2003	2008/2009	2002/2003	2008/2009
Até 2 s.m. ¹	34,5	29,6	3,4	2,3
Mais de 2 a 3 s.m. ¹	31,9	27,0	2,9	1,9
Mais de 3 a 5 s.m. ¹	27,8	23,6	2,4	1,3
Mais de 5 a 10 s.m. ¹	23,8	19,8	1,6	0,8
Mais de 10 a 15 s.m. ¹	19,4	17,3	1,1	0,6
Mais de 20 a 30 s.m. ¹	14,9	15,0	0,7	0,5

¹ s.m. = Salário mínimo

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2008

Gás natural e GLP são utilizados em residências também para aquecimento de água. Entretanto, embora o consumo de GLP esteja diretamente relacionado à renda média das famílias, o resultado da pesquisa indica que, à medida que cresce a renda (ou os gastos com consumo), diminui a proporção da renda gasta com alimentação e, conseqüentemente, com gás doméstico.¹¹ Essa afirmativa pode ser verificada ao desagregarmos a análise por nível de classe de renda familiar. Esse processo se intensificou em quase todas as classes de renda consideradas, ao compararmos os dois últimos períodos da pesquisa.

9 O *cooktop* é um fogão de mesa que não tem forno acoplado.

10 O Selo Conpet de Eficiência Energética visa destacar, para o consumidor, aqueles modelos que atingem os graus máximos de eficiência energética na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro. Concedido anualmente pela Petrobras, o selo é um estímulo à fabricação de modelos cada vez mais eficientes.

11 Lei de Engel.

2.1.4.1 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Ao analisar a utilização preferencial de combustíveis para a cocção de alimentos, verifica-se que o GLP é o mais utilizado (93,2%), seguido de lenha (3,2%), gás natural (2,9%) e carvão vegetal (0,7%), conforme a Figura 25.

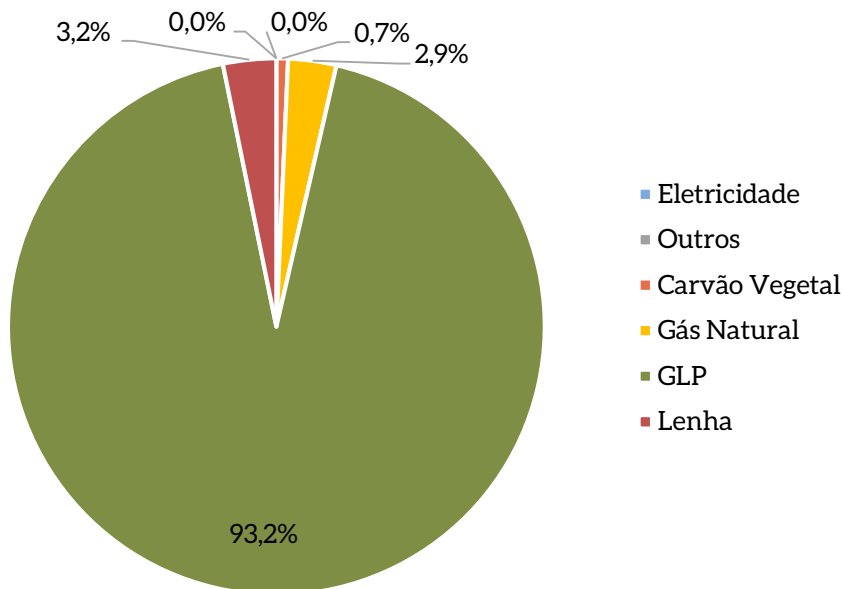


Figura 25 – Utilização Preferencial de Combustível para Cocção (2012)

Fonte: Elaboração própria a partir dos microdados de IBGE, 2012a

Quanto ao rendimento dos equipamentos utilizados para cocção, a Figura 26 apresenta a distribuição dos modelos de fogões comercializados no país segundo a faixa de eficiência dos queimadores. A amostra contempla 374 equipamentos cujo rendimento pode variar entre 57% e 66%. Os queimadores na faixa de eficiência A (eficiência superior a 63%) representam 74% dos equipamentos e têm o Selo Conpet de eficiência.

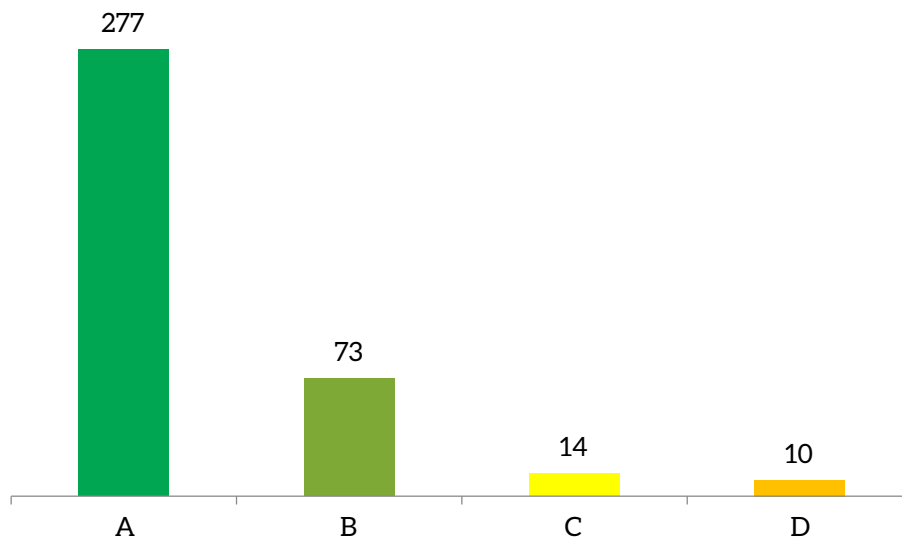


Figura 26 – Distribuição dos Fogões Comercializados segundo Eficiência dos Queimadores

Fonte: Elaboração própria a partir de CONPET, 2014

A Figura 27 apresenta a distribuição dos modelos de *cooktops* comercializados no país segundo a faixa de eficiência dos queimadores. A amostra contempla 280 equipamentos cujo rendimento pode variar entre 52% e 69%. Os queimadores na faixa de eficiência A (eficiência superior a 63%) representam 49% dos equipamentos e têm o Selo Conpet de eficiência. Dentre os equipamentos etiquetados com o Selo Procel, os modelos de fogões têm fornos cujo volume pode variar entre 119,5 L (com consumo de 0,15 kg/h de GLP) e 36 L (com consumo de 0,076 kg/h de GLP). Ambos os equipamentos citados têm queimadores com rendimento de 63% e estão na faixa A de eficiência.

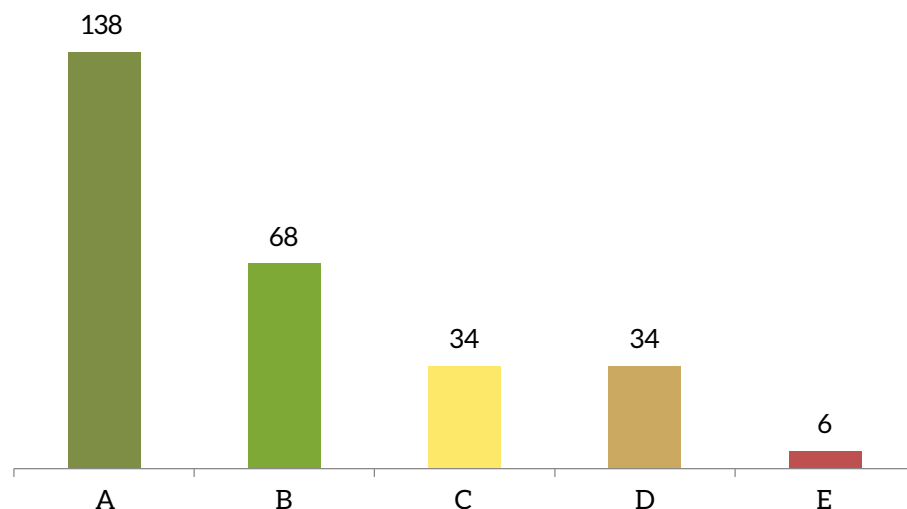


Figura 27 – Distribuição dos Cooktops Comercializados segundo Eficiência dos Queimadores

Fonte: Elaboração própria a partir de CONPET, 2014

2.1.4.2 MTD

Como descrito anteriormente, dentre os equipamentos utilizados para a cocção de alimentos, cujas fontes de energia utilizadas são o GLP e o gás natural, se destacam o fogão e o *cooktop*. Para a descrição dos melhores fogões e *cooktops* disponíveis no mercado, as linhas de corte utilizadas foram:

- a) Rendimento médio dos queimadores – apenas equipamentos com etiqueta Procel A;
- b) Tipologia do equipamento; fogão/*cooktop* e número de bocas.

Após esse filtro inicial, foi selecionado e definido como a MTD o equipamento que obtivesse melhor rendimento médio dos queimadores. Os resultados obtidos estão disponibilizados na Tabela 13.

Tabela 13 – MTD para Cocção de Alimentos (2014)

Número de equipamentos	Tipo	Marcas	Rendimento médio dos queimadores (%)	Consumo (forno)	MTD	Preço (R\$)
103	Fogão 4 bocas	Brastemp, Consul, Atlas, Braslar, Realce, Electrolux, Itatiaia, Mueller e Venax	63-65	0,083-0,138	Brastemp – BFCBUNA (Clean)	839,00
68	Fogão 5 bocas	Brastemp, Consul, Atlas, Electrolux, Itatiaia, Mueller e Venax	63-65	0,117-0,161	Itatiaia – Waves 5Q BRA	719,90
36	Fogão 6 bocas	Consul, Atlas, Electrolux, Itatiaia, Mueller e Venax	63-65	0,1158-0,161	Itatiaia – Waves 6Q BRA	699,90
16	<i>Cooktop</i> (1 a 3 bocas)	Built, Layr, Cadence, Eletromec, Fischer, Franke, Luminer, Safanelli, Continental, Casavitra e Tramontina	63-67	-	Cadence – Top200 BIV	340,00
59	<i>Cooktop</i> 4 bocas	Atlas, Daily, Built, Layr, Cadence, Cata, Eletromec, Esmaltec, Fischer, Franke, Luminer, Safanelli, Continental, Casavitra e Tramontina	63-69	-	Cadence – Top400 BIV	408,00
63	<i>Cooktop</i> 5 bocas	Atlas, Daily, Built, Layr, Cadence, Cata, Eletromec, Esmaltec, Fischer, Franke, GE, Luminer, Safanelli, Continental, Casavitra e Tramontina	63-68	-	Cadence – Top500 BIV	599,90

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Foram encontrados 103 modelos de fogão de quatro bocas com selo A do Procel, cujo rendimento médio dos queimadores varia entre 63% a 65%. Porém, ao selecionar apenas os equipamentos com rendimento médio de 65%, o fogão Brastemp foi o mais eficiente dentre os critérios utilizados, incluindo o consumo do forno e o preço de aquisição de R\$ 839,00.

A mesma análise pode ser replicada para os cooktops. Foram encontrados 59 equipamentos de quatro bocas com selo A do Procel, cujo rendimento médio dos queimadores varia entre 63% a 69%. Porém, ao selecionarmos apenas os equipamentos com rendimento médio de 69%, o cooktop Cadence Top 400 – BIV foi o mais eficiente dentre os critérios utilizados, com preço de aquisição de R\$ 408,00.

2.1.5 AQUECIMENTO DE ÁGUA

Para o aquecimento de água, as principais fontes utilizadas atualmente no Brasil são energia elétrica, gás natural e GLP. Para esse fim, a opção de uso por determinada fonte energética apresenta forte correlação com a renda dos consumidores, a posse de equipamentos e a interligação às redes de distribuição de gás. Mais recentemente e em menor escala, usa-se como fonte de aquecimento de água também a energia solar captada pelo sistema de aquecimento solar (SAS).

O chuveiro elétrico responde, em média, por 20% do consumo da energia elétrica do setor residencial, variando entre 18% a 22%, a depender da estação do ano (GHISI et al., 2007). O consumo de gás natural ou GLP para aquecimento de água está atrelado à interligação da residência à rede de distribuição.

Segundo Ghisi et al. (2007), a utilização de gás natural e GLP no setor residencial para aquecimento de água é restrita a alguns estados do país, como Bahia (23% do consumo de energia para aquecimento de água são relativos ao gás natural e/ou GLP, por exemplo), Rio de Janeiro (17%), Pernambuco (14%), Paraná (8%) e Espírito Santo (8%).

2.1.5.1 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

O chuveiro elétrico está presente em mais de 76% das residências brasileiras, segundo dados do Procel (2007). Os resultados da pesquisa resgatam o valor do chuveiro elétrico, invenção brasileira de mais de 80 anos, considerada a forma mais barata e acessível para a população brasileira tomar banho quente, resguardando o seu direito a saúde, dignidade e higiene.

O equipamento é acessível a quase todas as famílias brasileiras e custa em média R\$ 50,00 (equipamento com potência de 5.500 W). Sobre aquecedores a gás natural ou GLP, o mesmo não pode ser dito, dado que o preço do equipamento pode variar entre R\$ 596,90 a R\$ 1.990,00 (a depender da vazão em litros, marca e potência).¹²

¹² Pesquisa de preço realizada em 15 de junho de 2014, no site www.amoedo.com.br.

Além da diferença de preço, outro ponto relevante para a comparação entre os dois tipos de equipamentos mais utilizados para aquecimento de água é a média anual de consumo de água, que no chuveiro elétrico foi de 4,2 L/min e para o aquecedor a gás pode chegar a 8,7 L/min, ou seja, 207% maior que o consumo do chuveiro elétrico.¹³

A Tabela 14 apresenta a distribuição dos modelos de chuveiros elétricos comercializados no país segundo a classe de potência dos equipamentos.

Tabela 14 – Classificação dos Chuveiros Elétricos Comercializados segundo a Classe de Potência do Equipamento e Utilização Indicada

Marcas/ Modelo	Potência (P) em watts	Utilização indicada
A	$P < 2.400$	Preferencialmente em regiões de clima mais quente, como a região Norte
B	$2.400 > P < 3.500$	
C	$3.500 > P < 4.600$	
D	$4.600 > P < 5.700$	Preferencialmente em regiões de clima médio e quente, como as regiões Nordeste e Centro-Oeste
E	$5.700 > P < 6.800$	
F	$6.800 > P < 7.900$	Preferencialmente em regiões de clima médio e frio, como as regiões Sudeste e Sul
G	$P > 7.900$	

Fonte: Elaboração própria a partir de CONPET, 2015

A variação no consumo mensal de energia pode ser significativa quanto à classe de potência do chuveiro instalado. Por exemplo, chuveiros na classe de potência B têm consumo mensal que pode variar entre 13 kWh e 8,9 kWh, com vazão de água de 3 L/min. E chuveiros na classe de potência F têm consumo mensal que pode variar entre 33,4 kWh e 10,6 kWh, com vazão de água de 3,3 L/min.

Se considerarmos um tempo médio de banho de dez minutos por dia, no final de mês, o consumo residencial de energia elétrica para uma família de quatro pessoas pode variar entre 19% (para valores inferiores) e 56% (para valores superiores).¹⁴ Além disso, é recomendável que a potência do equipamento utilizado esteja em conformidade com o clima da região de localização do domicílio (Tabela 14).

Quanto à classe de potência dos chuveiros elétricos utilizados para aquecimento de água, a Figura 28 apresenta a distribuição dos modelos comercializados. A amostra contempla 320 equipamentos cuja eficiência mínima atingida é de 95%. Os equipamentos na classe de potência D, com potência entre 4.600 W e 5.700 W, representam a maior parcela comercializada, ou seja, 47% dos equipamentos.

¹³ Esse dado é relevante se levarmos em consideração que a água tratada é o bem mais escasso do mundo atualmente. Segundo dados divulgados pela ONU, 1,8 bilhão de pessoas enfrentarão níveis críticos de falta de água já em 2025, o que afetará 2/3 da população mundial.

¹⁴ O consumo de água no mesmo período também poderá ser superior a 10%.

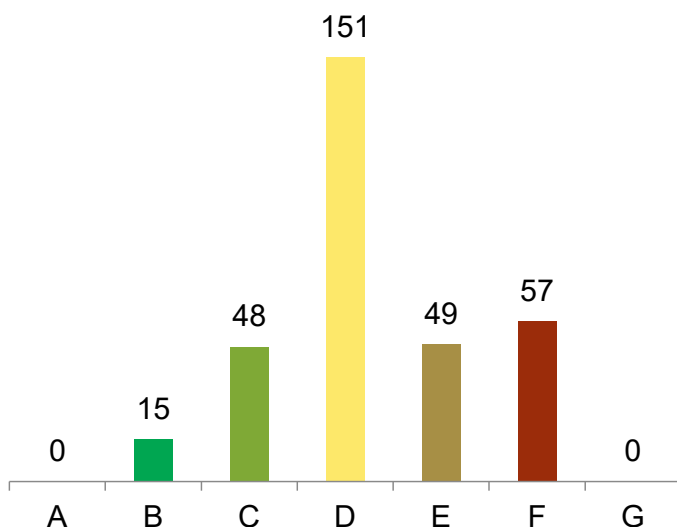


Figura 28 – Distribuição dos Chuveiros Elétricos Comercializados segundo a Classe de Potência do Equipamento (número de modelos etiquetados)

Fonte: Elaboração própria a partir de CONPET, 2015

A Figura 29 apresenta a distribuição dos modelos de aquecedores a gás natural instantâneos comercializados no país segundo a faixa de eficiência. A amostra contempla 138 equipamentos cujo rendimento pode variar entre 79% e 100%. Os aquecedores na faixa de eficiência A (eficiência superior a 84%) representam 61% dos equipamentos que têm o Selo Conpet de eficiência. Dentre os aquecedores a gás natural com selo A de eficiência, há equipamentos com diferentes consumos e potências que podem variar entre 7,5 L/min e 44 L/min e 12,6 a 71,8 kW, respectivamente.

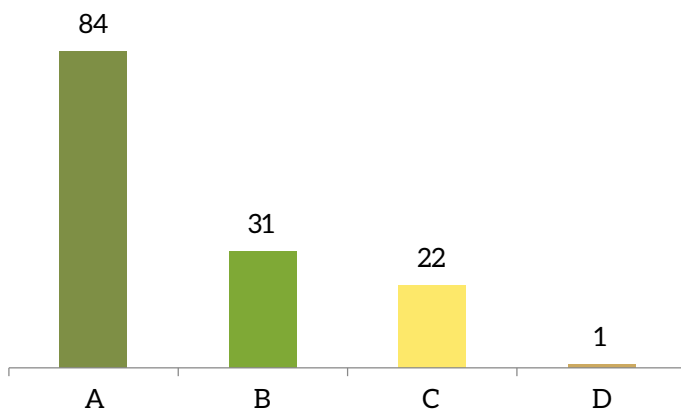


Figura 29 – Distribuição dos Aquecedores Instantâneos a Gás Natural Comercializados por Faixa de Eficiência (número de equipamentos etiquetados)

Fonte: Elaboração própria a partir de CONPET, 2015

A Figura 30 apresenta a distribuição dos modelos de aquecedores a GLP instantâneos comercializados no país segundo a faixa de eficiência. A amostra contempla 139 equipamentos cujo rendimento pode variar entre 80% e 100%. Os aquecedores na faixa de eficiência A (eficiência superior a 84%) representam 66% dos equipamentos que têm o Selo Conpet de eficiência. Dentre os aquecedores a

GLP com selo A de eficiência, há equipamentos com diferentes consumos e potências que podem variar entre 7,5 L/min e 47,5 L/min e 12,5 a 78,1 kW, respectivamente.

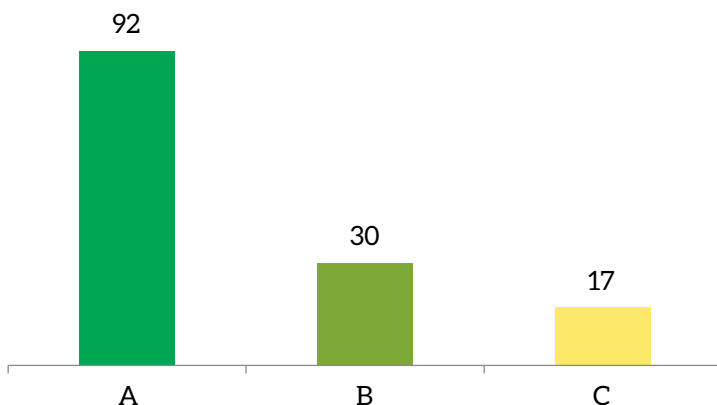


Figura 30 – Distribuição dos Aquecedores Instantâneos a GLP Comercializados por Faixa de Eficiência (número de equipamentos etiquetados)

Fonte: Elaboração própria a partir de CONPET, 2015

O SAS é responsável pela captação da energia solar, transformando-a em energia térmica e, por fim, transferindo-a para a água utilizada para banho ou outros fins. Basicamente, existem dois tipos de coletores: coletor plano (aberto ou fechado) e coletor tubular a vácuo. O SAS é composto por coletor, reservatório térmico, tubulações e bomba hidráulica para deslocamento do fluido, principalmente no caso de grandes instalações.¹⁵

O coletor é composto por uma placa coletora com a finalidade de absorver a energia solar transferindo-a ao fluido de trabalho. A placa é comumente feita de alumínio ou cobre, posteriormente pintada de preto para aumento de absorção da energia solar.¹⁶ O uso de superfície seletiva, em vez da pintura usualmente utilizada, uma espécie de tratamento químico da placa, pode aumentar sua eficiência de absorção e diminuir sua emissão de radiação. Esse procedimento faz-se interessante, sobretudo, em país com baixa radiação solar, como a Alemanha.

O absorvedor é responsável por aproximadamente 90% da eficiência do sistema. No interior da caixa coletora, encontra-se o circuito hidráulico (tubos absorvedores), no qual o fluido de trabalho se desloca (Figura 31). O fluido é constituído de água adicionada a um composto anticongelante, glicol ou outro fluido térmico, ao passo que os tubos (serpentina) normalmente são feitos de cobre.¹⁷

¹⁵ A circulação da água no sistema é feita de forma forçada ou por termossifão. A primeira é feita por meio do bombeamento de água pelo sistema e, portanto, com gasto de energia. A segunda é feita com base na variação de temperatura da água e, assim, sua densidade.

¹⁶ Em estudo para o país, algumas cidades apresentaram 99% de placas coletoras feitas de alumínio e apenas 1% feito de cobre, em que o uso final era aquecimento de água para o banho (www.procelinfo.com.br).

¹⁷ O cobre é indicado no coletor onde há circulação de água, dada sua capacidade de suportar altas temperaturas e alta condutividade, sem comprometimento de suas características.

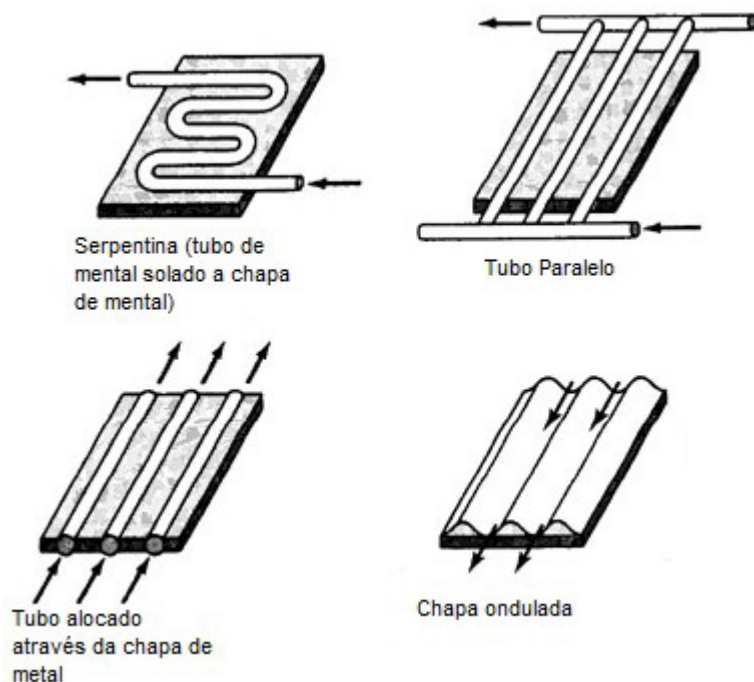


Figura 31 – Tubos Coletores para Coletor Plano Fechado

Fonte: OLIVEIRA, 2014

Com exceção de coletores abertos, todos os modelos apresentam uma caixa externa para minimização de perdas, sobretudo na troca de calor entre o coletor e o fluido de trabalho. Sua face voltada para o sol deve ser transparente, usualmente feita de vidro de modo a permitir a passagem da energia solar, minimizando perdas por convecção e radiação. Essa cobertura caracteriza-se por ser transparente à luz visível do espectro solar, mas opaca ao espectro de emissão da placa. O interior da caixa é revestido ainda por um isolante.

O reservatório térmico deve ser feito de materiais resistentes à corrosão, como cobre e aço inoxidável. Assim como a caixa externa do coletor, dispõe de um revestimento isolante formado de lã de vidro ou espuma de poliuretano. No interior do reservatório, há uma resistência elétrica para aquecimento nos dias de baixa insolação, podendo ser acionada automaticamente (termostato) ou manualmente.

2.1.5.1.1 COLETOR FECHADO

- Normalmente aplicado para o banho, mas também para uso na cozinha e outras atividades;
- O revestimento isolante interno da caixa externa é feito de lã de vidro ou de rocha ou espuma de poliuretano;
- Atinge temperatura na faixa de 50°C a 80°C.

2.1.5.1.2 COLETOR ABERTO

- Normalmente empregado no aquecimento de piscinas, onde a temperatura demandada não é muito elevada;
- A principal diferença desse modelo é a inexistência da caixa externa, cobertura transparente e isolamento;
- Atinge temperatura na faixa de 26°C e 30°C.

2.1.5.1.3 COLETOR A VÁCUO

- Normalmente aplicado na indústria, em locais onde a temperatura externa é baixa e/ou com baixa radiação solar ou para atividades em que há demanda de água de alta temperatura;
- Tem esse nome em função do revestimento isolante interno da caixa externa, formado a vácuo. Essa característica aumenta a eficiência do sistema, minimizando perdas por convecção;
- Cobertura de vidro simples ou duplo. O vidro duplo passou a ser empregado em função da dificuldade de se manter o vácuo com uma única camada;
- Os tubos coletores são feitos de vidro borossilicato temperado, com capacidade de absorção de até 96% da energia incidente ou quase o triplo do absorvido por vidros convencionais;
- Atinge temperatura na faixa de 100°C a 150°C.

Deve-se notar que coletores planos se mostram mais eficientes em aplicações que requerem água em temperatura média, como a do banho. Por outro lado, coletores tubulares a vácuo (evacuados) apresentam vantagens interessantes quando se trabalha com altas temperaturas nos coletores, tipicamente em processos industriais.

Em estudo comparativo entre as tecnologias, para uma mesma área de coletor, verificou-se que, ao longo do período de estudo, o coletor plano produziu 34% mais energia que o tubular a vácuo para uma mesma capacidade de armazenamento do reservatório e temperatura ambiente média de 25°C (MESQUITA, 2013).

De fato, o sistema indicado para uma dada atividade é função do diferencial entre temperatura de operação e temperatura ambiente. Todos os coletores apresentam redução de eficiência para operações em alta temperatura do fluido de trabalho, sendo essa perda função da tecnologia empregada (IEA, 2012; MESQUITA, 2013). Assim, para pequenos diferenciais de temperatura, coletores planos são mais indicados, no entanto, para temperatura de trabalho a partir de 50°C acima da temperatura ambiente, coletores evacuados são os mais indicados, conforme a Figura 32.

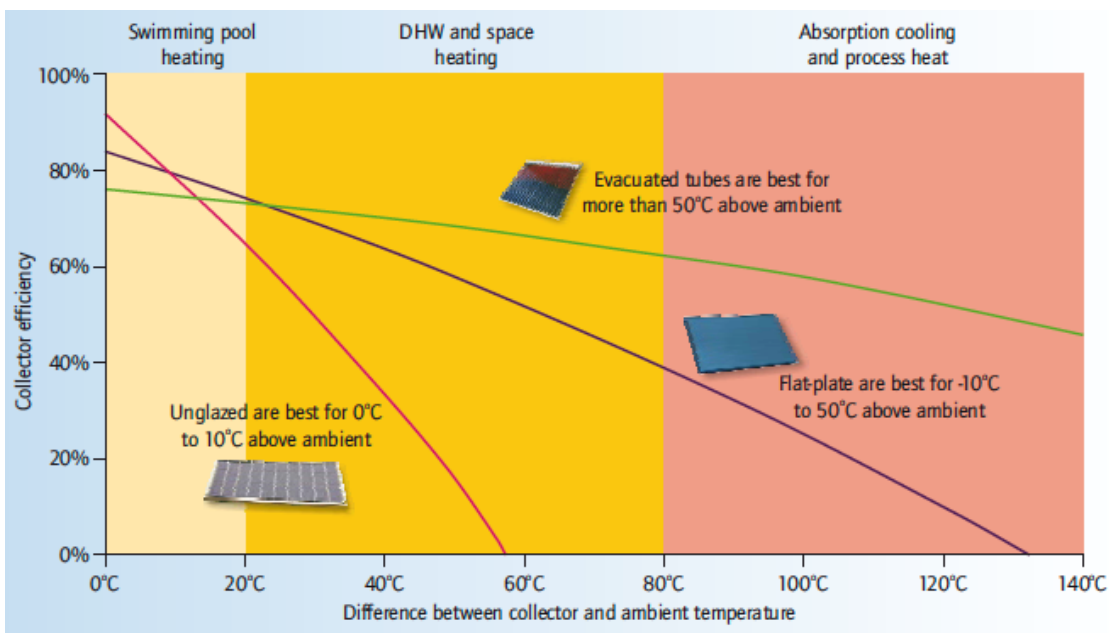


Figura 32 – Eficiência de Coletores por Tecnologia em função do Diferencial de Temperatura

Fonte: IEA, 2012

2.1.5.2 MTD

Como já descrito, dentre os equipamentos utilizados para aquecimento de água, cujas fontes de energia utilizadas são GLP, gás natural, energia elétrica e solar, destacamos o aquecedor de passagem e o chuveiro elétrico.

Para a descrição dos melhores aquecedores de passagem disponíveis no mercado, a linha de corte utilizada foi:

- Tipo de combustível utilizado pelo equipamento;
- Vazão em L/min para os aquecedores de passagem;
- Rendimento médio do equipamento – apenas equipamentos com etiqueta Procel A;
- Consumo do equipamento em kg/h.

Após esse filtro inicial, foi selecionado e definido como a MTD o equipamento que obtivesse melhor rendimento médio e menor consumo em kg/h. Os resultados para os aquecedores a gás natural e a GLP obtidos estão disponibilizados na Tabela 15 e na Tabela 16, respectivamente.

Tabela 15 – MTD de Passagem Disponíveis para Gás Natural (2014)

Número de Equipamentos	Vazão (L/min)	Marcas	Combustível	Consumo (kg/h)	Potência (kW)	Rendimento (%)	MTD	Preço (R\$)
12	4,5-8,5	Bosch, Kobe, Electrolux, Lorenzetti e Rinnai	GN	0,67-1,28	7,4-14,2	84-88	Lorenzetti - LZ 800 EF8 litros	914,90
22	11,0-19,5	Bosch, Kobe, Electrolux, Lorenzetti, Rinnai, Komeco, Orbis e Inova	GN	1,66-2,93	18,4-32,5	84-86	Orbis – 320QFBN 19 litros	941,00
21	20,0-26,5	Bosch, Kobe, Electrolux, Lorenzetti, Rinnai, Komeco e Orbis	GN	2,95-3,86	32,6-42,7	84-86	Lorenzetti - LZ 2200 FB 22 litros	1.491,00
24	30,5-39,5	Bosch, Lorenzetti, Rinnai, Komeco, Orbis e Rheen	GN	3,87-5,84	42,8-64,7	84-100	Komeco – KO 30 ECO 1BBGN3 30,5 litros	3.370,90
5	42,5-44,5	Komeco e Rinnai	GN	5,50-6,48	60,9-71,8	85-97	Rinnai – REU KM3237FFUD-E 42,5 L	8.690,00

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Foram encontrados 12 aquecedores com vazão¹⁸ de 4,5 L/min a 8,5 L/min (capaz de atender uma ducha), cujo rendimento médio varia entre 84% a 88%. Porém, ao selecionarmos apenas os equipamentos com rendimento médio de 88%, o aquecedor de passagem Lorenzetti - LZ 800 EF foi o mais eficiente entre os critérios utilizados, incluindo o consumo em kg/h e com preço de aquisição de R\$ 914,90.

¹⁸ O número de banheiros de uma residência e o número de pontos de água aquecidos são os fatores que determinam a capacidade do aquecedor medida em L/min: a) até 8 L (atende um banheiro com chuveiro); b) 10 a 15 L (atende um banheiro com chuveiro, podendo eventualmente atender um chuveiro e uma torneira simultaneamente); c) 18 a 20 litros (atende um banheiro, podendo atender dois banheiros próximos com duchas de 8 litros de vazão); d) 22 a 26 litros (atende dois banheiros, com ducha de no máximo 10 L de vazão); e) 30 a 37 L (atende três banheiros, com duchas de no máximo 10 L de vazão).

Tabela 16 – MTD de Passagem para GLP (2014)

Número de Equipamentos	Vazão (L/min)	Marcas	Combustível	Consumo (kg/h)	Potência (kW)	Rendimento (%)	MTD	Preço (R\$)
10	6-8,5	Bosch, Kobe, Electrolux, Lorenzetti e Rinnai	GLP	0,74-1,05	10,1-14,5	84-88	Lorenzetti – LZ 800 EF 8 litros	926,90
23	12-19	Bosch, Kobe, Electrolux, Lorenzetti, Rinnai, Equibrás, Komeco, Orbis e INOVA	GLP	1,43-2,18	19,8-30	84-86	Orbis-320QFBEN 19 litros	Não encontrado
31	20-29	Bosch, Kobe, Electrolux, Lorenzetti, Rinnai, Komeco, Orbis, INOVA, Equibrás, Nordike, Komlog, Rheen e Cumulos	GLP	2,95-3,86	32,6-42,5	84-86	Komeco – KO 30 ECO 1 BBLP3 29 litros	3.3370,00
23	30-39,5	Bosch, Cumulos, Komeco, Lorenzetti, Rinnai, Orbis, Rheen e Rinnai	GLP	3,59-4,57	49,5-62,9	84-100	Komeco – KO 40 ECO 1 BBLP3 39,5 litros	3.899,00
5	42-47,5	Komeco e Rinnai	GLP	4,43-5,67	61-78,1	85-97	Rinnai – REU KM3237FFUD-E 42,5 litros	8.690,00

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Para o intervalo de vazão entre 30 L/min a 39,5 L/min, foram encontrados 23 aquecedores (capazes de atender até três banheiros simultaneamente), cujo rendimento médio varia entre 84% a 100%. Porém, ao selecionarmos apenas os equipamentos com rendimento médio de 100%, o aquecedor de passagem Komeco – KO 40 ECO IBBLP foi o mais eficiente entre os critérios utilizados, incluindo o consumo em kg/h e com preço de aquisição de R\$ 8.690,00.

Para a descrição dos melhores chuveiros disponíveis no mercado, a linha de corte utilizada foi:

- a) Classe de potência do equipamento;
- b) Consumo do equipamento em kWh/mês.

Após esse filtro inicial, foi selecionado e definido como a MTD o equipamento que obtivesse menor consumo em kWh/mês. Os resultados para os chuveiros estão listados na Tabela 17.

Tabela 17 – MTD de Chuveiro Elétrico (2014)

Número de Equipamentos	Classe de potência	Faixa de consumo mensal (kWh/mês)	MTD	Preço (R\$)
8	2.400 < P < 3.500	8,8-14,5	Lorenzetti – 3 temperaturas Bello banho	47,90
26	3.500 < P < 4.600	9,7-25,4	Hiper ducha enershower flex	Não encontrado
110	4.600 < P < 5.670	8,3-26,3	Zagonel – Master eletrônica	86,20

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Para a classe de potência entre 2.400 W e 3.500 W, foram encontrados 83 modelos de chuveiros, cujo consumo médio mensal varia entre 8,8 kWh a 14,5 kWh. Porém, ao selecionarmos apenas os equipamentos com menor consumo médio mensal, o chuveiro Lorenzetti – três temperaturas Bello Banho – foi o mais eficiente entre os critérios utilizados, com preço de aquisição de R\$ 47,90.

Para verificar a existência dos melhores equipamentos disponíveis mundialmente para aquecimento de água, foram consultados os *sites* das seguintes iniciativas e de programas voltados para eficiência energética e etiquetagem: Energy Star (Estados Unidos), Topten-EU (União Europeia), Energy Conservation Center (Japão) e CLASP.¹⁹ Para o uso final aquecimento de água, somente no *site* do Energy Star foi encontrada a listagem para aquecedores de passagem etiquetados disponíveis no mercado norte-americano.

Para a descrição dos melhores aquecedores de passagem (*water heater tankless*) disponíveis no mercado norte-americano, a linha de corte utilizada foi:

- a) Marcas disponíveis também no mercado brasileiro;
- b) Tipo de combustível utilizado pelo equipamento;
- c) Vazão em L/min para os aquecedores de passagem;
- d) Eficiência energética do equipamento;
- e) Fator energético.

Após esse filtro inicial, foi selecionado e definido como a MTD o equipamento que obtivesse maior eficiência energética. Os resultados para os aquecedores de passagem estão listados na Tabela 18.

¹⁹ O CLASP é um *site* onde são publicados estudos específicos sobre eficiência energética em equipamentos de diversos países. Nessa página, também estão disponíveis recomendações sobre políticas de etiquetagem para auxiliar os consumidores e os agentes do setor energético a aprimorar o uso da energia, mantendo o mesmo nível de conforto e bem-estar.

Tabela 18 – MTD de Aquecedores de Passagem no Mercado Norte-americano (2014)

Número de equipamentos	Vazão (L/min.)	Marcas	Combustível	Fator energético	Rendimento (%)	MTD	Preço (US\$)
21	12,7-18,1	Electrolux e Rheem	GN ou GLP	0,82-0,94	83-95	Rheem – Ecosense ECOH 200 XLN ou XLP	999,00
17	11,3-18,5	Bosch e Rinnai	Flex (GN e GLP)	0,82-0,96	94-96	Bosch – Therm C1050 ES	1.275,00

Fonte: Elaboração própria a partir de ENERGY STAR, 2014b

Foram encontrados 21 aquecedores com vazão de 12,7 L/min a 18,1 L/min, cujo rendimento médio varia entre 85% a 95%. Porém, ao selecionarmos apenas os equipamentos com rendimento médio de 95%, o aquecedor de passagem Rheem – Ecosense ECOH 200 XLN – foi o mais eficiente entre os critérios utilizados, com preço de aquisição de US\$ 999,00.

Considerando-se opções de mitigação no segmento de aquecimento de água, coletores solares devem ser contemplados uma vez que essa tecnologia reduz o uso de outras fontes energéticas, como eletricidade, GLP ou gás natural. A etiquetagem de coletores no marco é feita com base na produção mensal de energia (PME), razão entre a produção mensal de energia e a área externa do equipamento, para uma radiação global no plano de 17,6 MJ/m² ao dia (Tabela 19).

A eficiência térmica do coletor é obtida pela integral de sua função de eficiência térmica, resultado do ensaio de desempenho térmico do equipamento. De forma geral, sistemas de maior eficiência são capazes de gerar maior quantidade de energia térmica com menor demanda de área utilizada pelo sistema.

Tabela 19 – Classe de Etiquetagem de Coletor Solar Aplicação Banho

Classe	PME (kWh/mês.m ²)
A	PME > 77
B	77 > PME > 71
C	71 > PME > 61
D	61 > PME > 51
E	51 > PME > 41

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Com base na classificação do Programa Inmetro,²⁰ observa-se na Figura 33 grande quantidade de módulos do tipo A, ou seja, com ótima eficiência, segundo a metodologia de classificação do programa. De 262 coletores cadastrados no programa, nenhum equipamento foi classificado nas faixas de menor eficiência C e D.

²⁰ Com base em sua última revisão (edição 09/14).

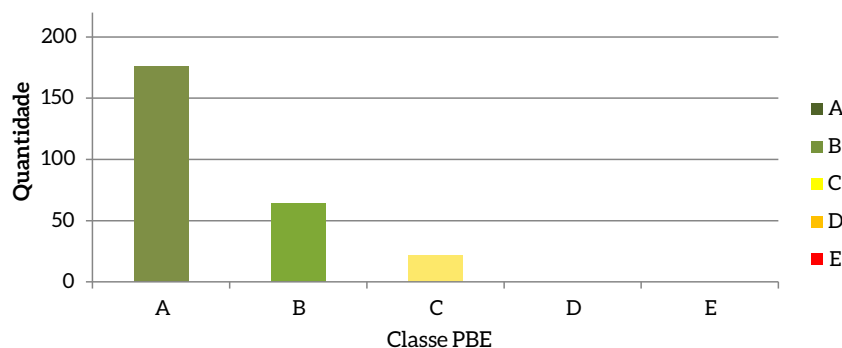


Figura 33 – Classificação do Coletor Solar em função de Sua Energia Específica

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

A etiquetagem para sistema com a finalidade de aplicação em piscina tem características similares ao direcionado para aplicação de banho, entretanto as classes de eficiência apresentam diferente classificação (Tabela 20). Para coletores específicos para aquecimento de piscina (128 modelos),²¹ 79,7% foram avaliados na classe A de eficiência, seguidos por 19,5% na classe B e 14,3% na classe C. Assim como observado em coletores exclusivos para banho, nenhum equipamento foi classificado nas faixas D e E de eficiência.

Tabela 20 – Classe de Etiquetagem de Coletor Solar Aplicação Piscina

Classe	PME (kWh/mês.m²)
A	PME > 95
B	95 > PME > 87
C	87 > PME > 79
D	79 > PME > 71
E	71 > PME > 63

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

O reservatório térmico do sistema permite que a água previamente aquecida seja utilizada em momentos em que a incidência do recurso solar é fraca ou inexiste. Sua eficiência é mensurada pela quantidade de energia perdida pelos limites do sistema em função do tempo (kWh/mês.L). Assim, quanto menor for esse valor, mais eficiente é o equipamento. Dado que para esse item o PBE não determina faixas de eficiência, atribuiu-se uma classificação própria para o estudo, conforme a Tabela 21.

²¹ Comumente coletor solar plano aberto.

Tabela 21 – Classe de Eficiência, Atribuída pelo Estudo, para Reservatório Térmico

Classe	Energia Perdida – Ep (kWh/mês.litro)
A	0,05 < Ep < 0,10
B	0,10 < Ep < 0,15
C	0,15 < Ep < 0,20
D	0,20 < Ep < 0,25
E	0,25 < Ep < 0,30

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

De acordo com características da edificação e de sua estrutura hidráulica, o reservatório empregado para o sistema será de alta ou baixa pressão, embora os de baixa pressão sejam mais utilizados. Dentre os equipamentos disponíveis, observa-se grande concentração entre as classes B e C de eficiência (Figura 34).

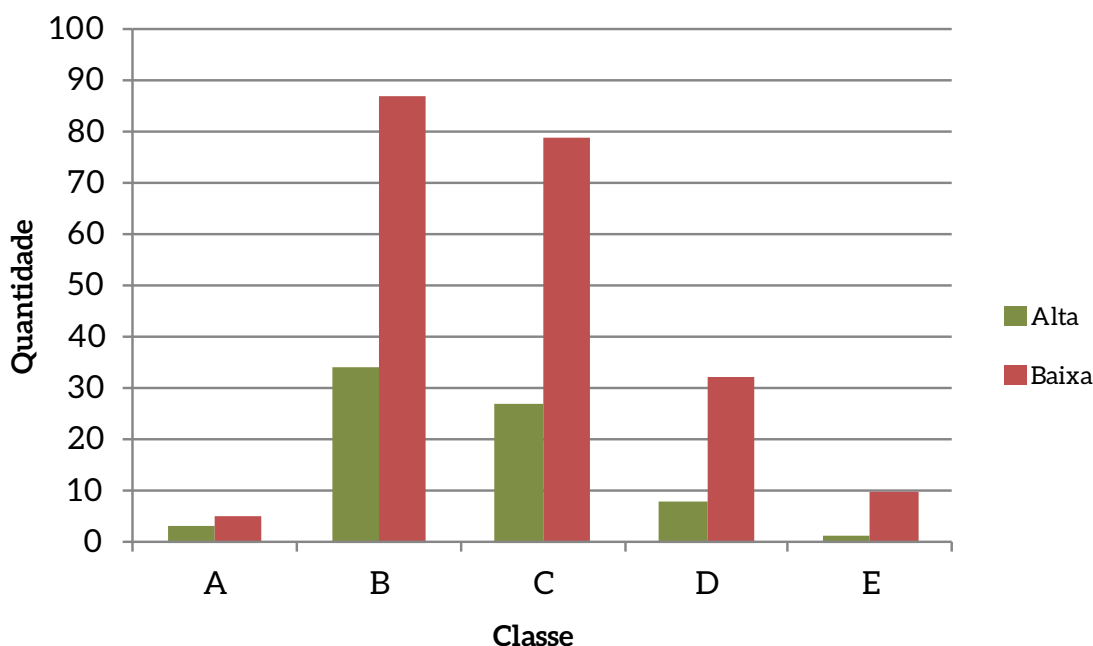


Figura 34 – Reservatórios Térmicos por Classe de Eficiência e Pressão de Trabalho

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Os reservatórios de menor eficiência localizam-se, sobretudo, em equipamentos com menor capacidade de armazenamento, em litros (Figura 35). Esse aspecto é de especial relevância para o setor residencial, onde comumente utilizam-se equipamentos de 200 a 500 L, embora, para instalações em prédios residenciais, sejam utilizados reservatórios de, no mínimo, 1.000 L, chegando até a 20.000 L (PROCEL/ELETRONBRAS, 2010). Dado que o PBE não abrange reservatórios dessa magnitude, esse nicho encontra-se descoberto pelo sistema de etiquetagem. Todos os equipamentos de maior eficiência cadastrados comportam, no mínimo, 600 L de armazenamento.

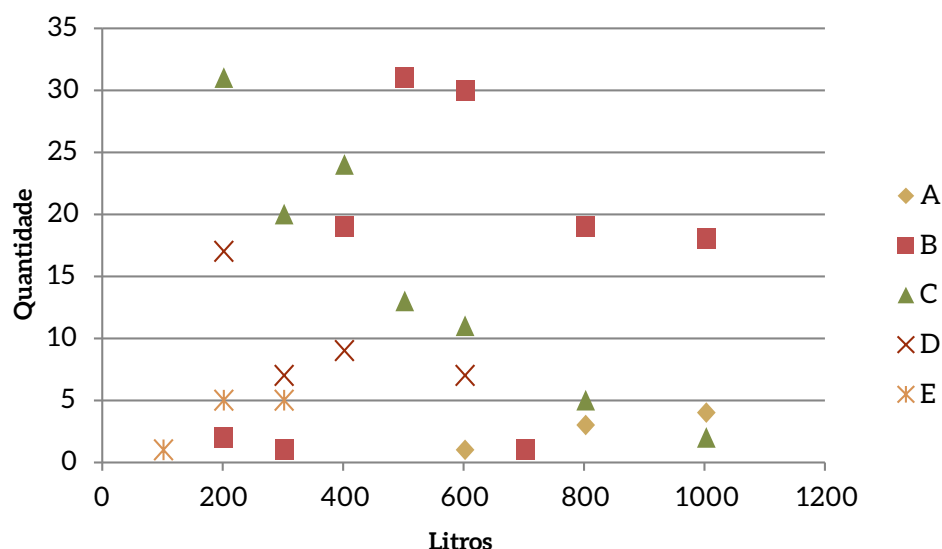


Figura 35 – Reservatórios por Classe e Capacidade (L)

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

2.1.6 OUTROS USOS

Esta categoria se refere ao uso de energia elétrica em eletrodomésticos como televisores, aparelhos de som, ferros de passar, máquinas de lavar, micro-ondas, computadores, rádios, DVDs, impressoras, liquidificadores, ventiladores, batedeiras, telefone, entre outros.

2.1.6.1 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Nesta subseção, será apresentada uma caracterização tecnológica dos produtos que participam do PBE e que, portanto, estão autorizados a ter a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (Ence). Nota-se que, pela própria diversidade dessa categoria, não é possível descrever com detalhes todas as tecnologias utilizadas para os outros usos. No entanto, serão descritos os principais equipamentos que consomem energia em uma residência.

2.1.6.1.1 TELEVISÃO

Segundo Procel/Eletrobras (2007b) e dados das Pnad 2001-2012, os televisores estão presentes em quase todos os domicílios do Brasil, configurando-se como o eletrodoméstico com a maior posse média. Tal como se verifica na Figura 36, 56,4% dos televisores nos domicílios do Brasil têm menos de cinco anos de uso, enquanto outros 32,20% têm menos de dez anos de uso, o que indica que 88,6% do parque de televisores é relativamente novo (PROCEL/ELETROBRAS, 2007b).

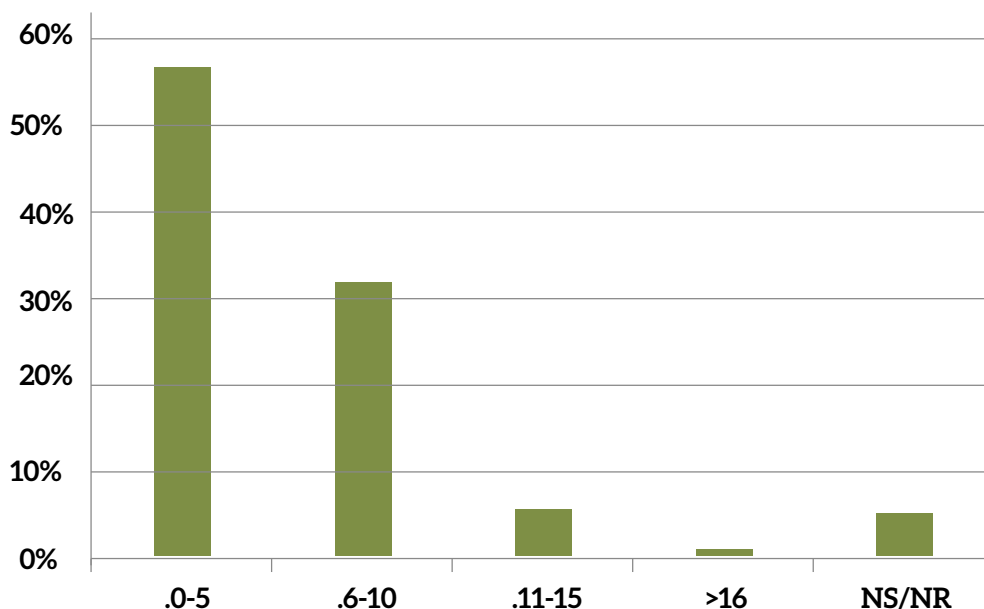


Figura 36 – Faixa de Idade dos Televisores (2005)

Fonte: PROCEL/ELETROBRAS, 2007b

Quanto à eficiência dos televisores comercializados no Brasil, Procel/Eletrobras (2008) definiu critérios para a concessão do Selo Procel/Eletrobras, sendo que a classificação A é obtida segundo o critério de consumo energético no modo *stand-by*. No mesmo sentido, afirma-se que o televisor de plasma, LCD ou projeção deverá respeitar consumo energético no modo *stand-by* máximo de 1 W. A Tabela 22 mostra a classificação proposta por Procel/Eletrobras (2008). Ainda está em estudo a classificação de eficiência segundo o modo ativado.

Tabela 22 – Classificação dos Televisores segundo a Classe de Potência no Modo *Stand-by*

Classe	Potência (P) em watts
A	$P \leq 1$
B	$> 1,0 \text{ } P \leq 3,2$
C	$> 3,2 \text{ } P \leq 5,4$
D	$> 5,4 \text{ } P \leq 7,8$

Fonte: Elaboração própria a partir de PROCEL/ELETROBRAS, 2008

Quanto à quantidade de modelos etiquetados e comercializados de televisores, a Figura 37 mostra essa informação por tipo de televisor. A amostra leva em consideração 962 equipamentos, sendo que apenas 12 televisores do tipo CRT (*cathode ray tube*) se encontram classificados na classe B, e o restante pertence à classe A, ou seja, a potência no modo *stand-by* é ≤ 1 W.

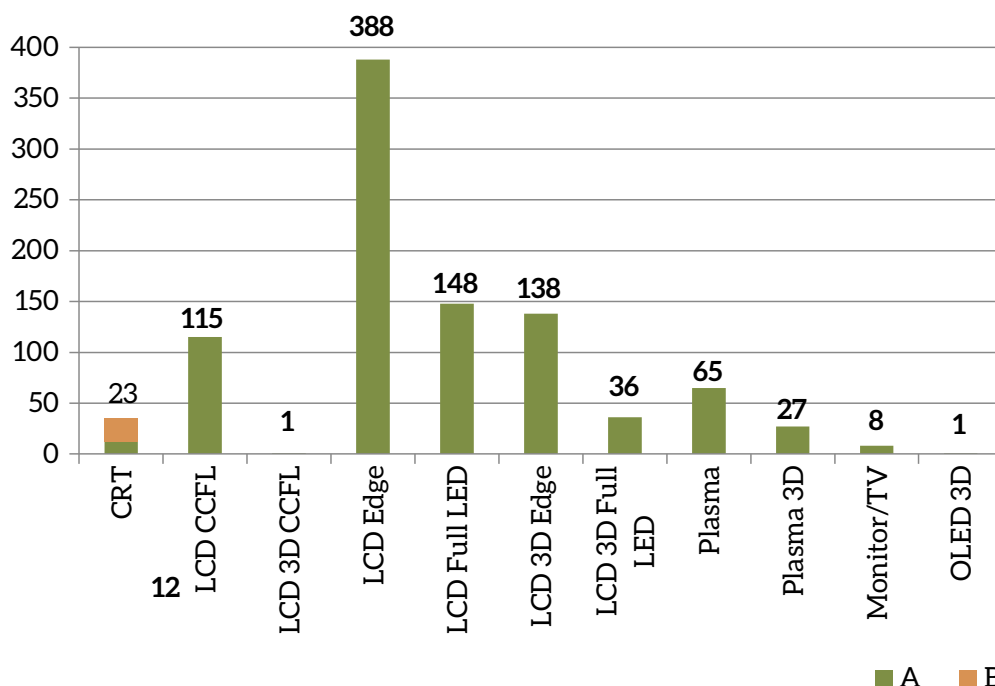


Figura 37 – Distribuição dos Televisores Comercializados segundo a Classe de Potência do Equipamento no Modo Stand-by (número de modelos etiquetados)

Fonte: Elaboração própria a partir de PROCEL/ELETRONBRAS, 2008

2.1.6.1.2 FORNO DE MICRO-ONDAS

O Inmetro classifica os fornos de micro-ondas segundo sua eficiência em três faixas, conforme a Tabela 23. É possível concluir que apenas estão autorizados a serem comercializados fornos de micro-ondas com eficiência mínima de 45%.

Tabela 23 – Classificação dos Fornos Micro-ondas segundo Sua Eficiência

Classe	Eficiência energética (%)
A	Eficiência $\geq 54\%$
B	$54\% > \text{Eficiência} \geq 49\%$
C	$49\% > \text{Eficiência} \geq 45\%$

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014a

A Figura 38 apresenta 143 modelos de equipamentos autorizados a exibir a Ence, dos quais 46,85% se encontram na faixa mais eficiente ($\geq 54\%$), 50,35% pertencem à faixa B de eficiência e os restantes 2,8% à classe C, de menor eficiência.

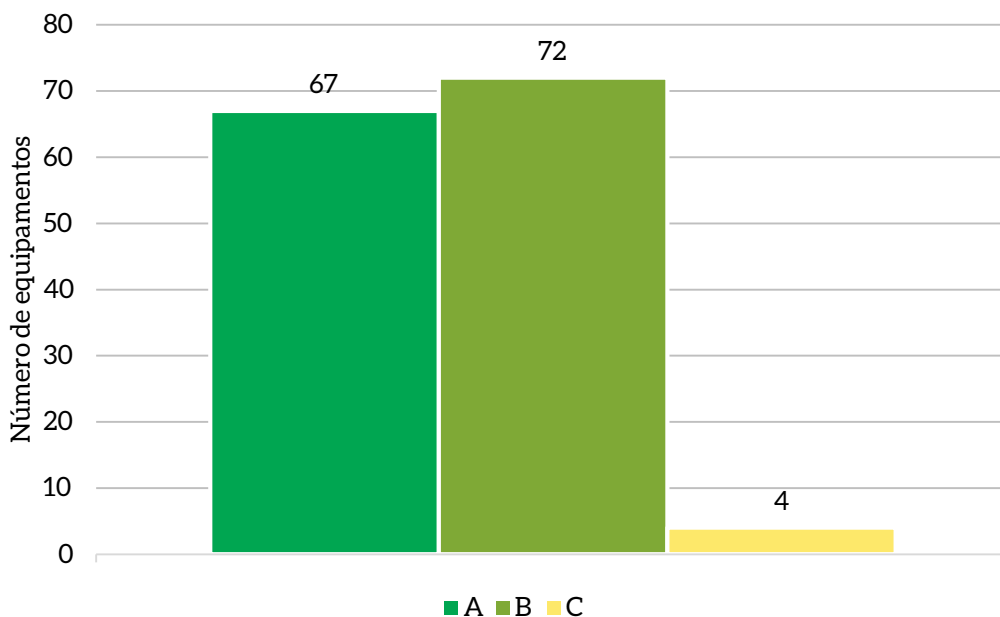


Figura 38 – Distribuição dos Fornos de Micro-ondas Comercializados segundo Eficiência (número de modelos etiquetados)

Fonte: Elaboração própria com dados de INMETRO, 2014

2.1.6.1.3 MÁQUINA DE LAVAR

O Inmetro classifica as máquinas de lavar roupa segundo o consumo específico de energia com água fria (kWh/ciclo/kg), levando em consideração cinco tipos: semiautomática, cuja eficiência superior é de até 0,019 kWh/ciclo/kg; e com abertura superior, central e com abertura superior (lava e seca) e frontal (lava e seca), cuja faixa superior é de até 0,031 kWh/ciclo/kg²², conforme a Tabela 24.

Tabela 24 – Classificação das Lavadoras de Roupa segundo Consumo Específico de Energia Água Fria (kWh/ciclo/Kg)

Classe	Semiautomática	Lavadora de roupas de abertura superior/central, abertura superior lava e seca/central lava e seca
A	0,019	0,031
B	0,022	0,035
C	0,025	0,039
D	0,028	0,043
E	0,031	0,047

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

²² Além da classificação aqui apresentada, Inmetro (2014) classifica as máquinas de lavar de acordo com a eficiência na centrifugação da seguinte forma: A (60%), B (68%), C (76%), D (84%) e E (94%).

A Figura 39 mostra 280 modelos de máquinas de lavar que contam com a Ence, classificados por classe de consumo específico e tipo de lavadora de roupa. 97% estão na classe A, enquanto 2,85% encontram-se classificados na categoria B, sendo que apenas máquinas de lavar com abertura central (2) e semiautomáticas (6) fazem parte dessa última classe.

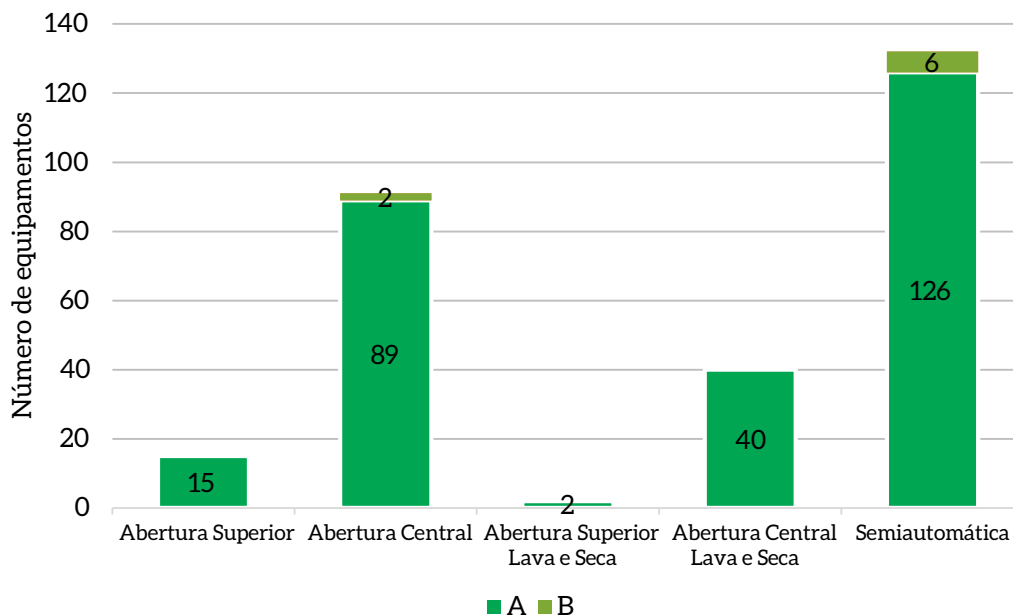


Figura 39 – Distribuição das Máquinas de Lavar Comercializadas segundo Eficiência (número de modelos etiquetados)

Fonte: Elaboração própria com dados de INMETRO, 2014

2.1.6.1.4 VENTILADOR DE TETO

Os ventiladores de teto autorizados a exibir a Ence estão classificados por classes de eficiência energética, sendo que essa variável é medida como a razão entre a vazão média de ar produzido (m^3/s) e a potência elétrica (W). Essa classificação leva em consideração ventiladores de teto de diferentes velocidades (alta, média e baixa) e divisão por nível de tensão.

A Tabela 25 mostra as faixas de eficiência energética por cada tipo de aparelho. Pode-se observar que a maior exigência se apresenta nos ventiladores de velocidade alta, cujo valor deve ser maior de $0,019 \text{ m}^3/\text{s}/\text{W}$.

Tabela 25 – Classificação dos Ventiladores de Teto por Classes de Eficiência Energética [(m³/s)/W]

Classe	Eficiência energética (EE)		
	Velocidade alta	Velocidade média	Velocidade baixa
A	0,019 < EE	0,022 < EE	0,020 < EE
B	0,017 < EE ≤ 0,019	0,020 < EE ≤ 0,022	0,018 < EE ≤ 0,020
C	0,015 < EE ≤ 0,017	0,018 < EE ≤ 0,020	0,016 < EE ≤ 0,018
D	0,014 < EE ≤ 0,015	0,016 < EE ≤ 0,018	0,013 < EE ≤ 0,016
E	EE ≤ 0,014	EE ≤ 0,016	EE ≤ 0,013

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

A Figura 40 mostra 2.805 modelos de ventiladores de teto que foram etiquetados. 59% do total foram classificados na classe A, 11% na classe B, 9% na classe C, 10% na classe D e 12% na classe E. Uma quantidade maior de ventiladores de teto de 127 V conta com a etiqueta (1.592), o que representa 56% do total de ventiladores.

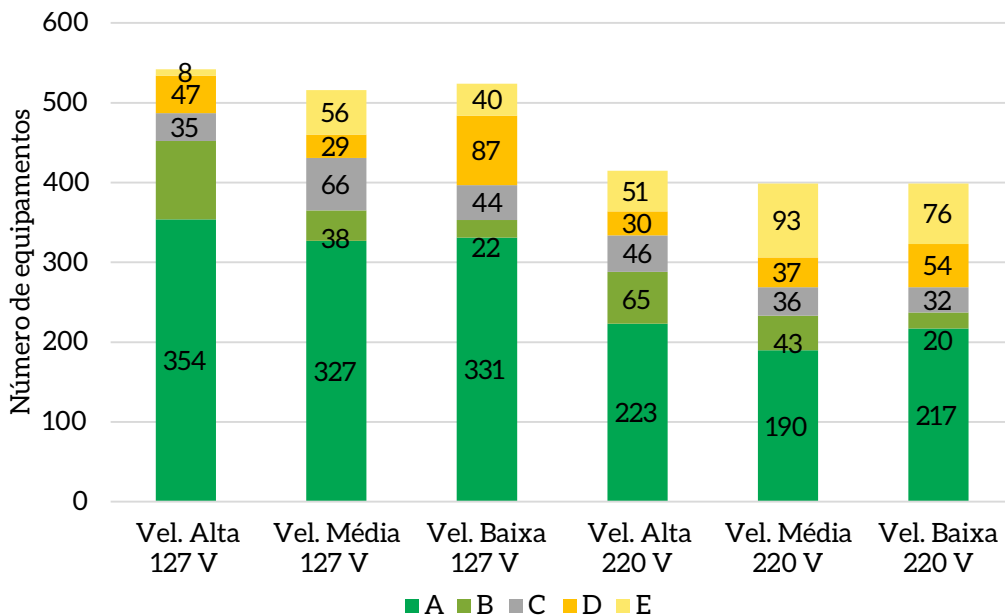


Figura 40 – Distribuição dos Ventiladores Comercializados segundo Eficiência (número de modelos etiquetados)

Fonte: Elaboração própria com dados de INMETRO, 2014

2.1.6.1.5 VENTILADOR DE MESA, PAREDE, PEDESTAL E CIRCULADOR DE AR

Por fim, apresentam-se as faixas de rendimento dos ventiladores de mesa, parede, pedestal e circuladores de ar, evidenciando-se que o equipamento mais eficiente é aquele que apresenta rendimento maior que 0,0040% (Tabela 26).

Tabela 26 – Classificação dos Ventiladores de Mesa, Parede, Pedestal e Circuladores de Ar (%)

Classe	Rendimento (η)
A	$\eta > 0,0040$
B	$0,0040 \geq \eta > 0,0035$
C	$0,0035 \geq \eta > 0,0030$
D	$\eta \leq 0,0030$

Fonte: Elaboração própria com dados de INMETRO, 2014

Apenas os equipamentos descritos anteriormente fazem parte do PBE. Eletrodomésticos como ferro de passar e som, que segundo Procel/Eletrobras (2007b) representam 3% cada do consumo de energia elétrica residencial, não participam desse programa.

No caso particular do ferro de passar, segundo o Inmetro (2014), foi realizada uma pesquisa de mercado em 12 estados: Goiás, Rondônia, Pará, Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Paraná. Foram identificados 23 fornecedores diferentes, entre fabricantes e importadores do produto. As marcas foram selecionadas de acordo com a tradição, regionalização e participação no mercado nacional, além de considerar quatro marcas de ferro nacionais e três importadas.²³

A pesquisa de mercado (INMETRO, 2014) concluiu que, embora os ferros a seco sejam mais tradicionais e mais acessíveis em termos financeiros, a penetração dos ferros a vapor é maior em decorrência do número crescente de marcas e modelos disponíveis e dos recursos e vantagens desse tipo de ferro. O resultado da pesquisa citada é mostrado na Tabela 27.

Tabela 27 – Ferros de Passar do Programa de Análises de Produtos Inmetro

Marcas / Modelo	Potência (W)	Potência medida (W)	Origem
A	1.200	1.200	SP
B	1.200	1.200	MG
C	1.200	1.200	China
D	1.200	1.200	SP
E	1.200	1.200	China
F	1.200	1.200	RJ
G	1.350	1.350	México

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

²³ Segundo Aliceweb, as importações de ferros elétricos passaram de 1.254.484 unidades, em 2009, para 2.562.695 unidades, com crescimento de 15,4% a.a., com valor de US\$ FOB/unidade, em 2014.

2.1.6.2 MTD

Para a descrição das MTD, tomou-se a melhor tecnologia classificada na faixa A do Inmetro. Da Tabela 28 até a Tabela 32, são apresentadas as especificações técnicas para: televisor, forno de micro-ondas, lavadora semiautomática, lavadora automática e ventilador de teto. Além disso, as tabelas apresentam o preço de cada um desses aparelhos no mercado brasileiro.

Tabela 28 – MTD Lavadora de Roupas Semiautomática

Fabricante	Marca	Modelo (código comercial)	Voltagem (V)	Quanto lava (kg)	Consumo de energia (kWh/ciclo)	Eficiência de lavagem	Consumo de água (l/ciclo)	Tempo de ciclo (min)	Selo Procel	Índice	Preço (R\$)
COLORMAQ	COLORMAQ	COLORMAQ 13,0	127	13	0,09	0,84	210	53	Sim	0.007	403,20

Fonte: Elaboração própria com dados do INMETRO, 2014

Tabela 29 – MTD Aparelho Televisor

Fabricante	Marca	Tipo	Modelo (código comercial)	Chasis	Potência stand-by média (W)	kWh/ mês	Voltagem (V)	Potência (W)	Frequência (Hz)	Polegadas	Preço (R\$)
Samsung	Samsung	LCD Edge	UN40F6400AGXZD	X12	0,04	0,03	100-240	126	50/60	40	1.283,00
Samsung	Samsung	LCD 3D Edge	UN40F6400AGXZD	X12	0,04	0,03	100-240	126	50/60	40	1.999,00

Fonte: Elaboração própria com dados do INMETRO, 2014

Tabela 30 – MTD Aparelho Forno de Micro-ondas

Marca	Modelo	Voltagem (V)	Potência nominal (W)	Consumo em stand-by (kWh/dia)	Eficiência energética (%)	Preço (R\$)
ELETTROMECC	FMC-30LX-1-GZ	127	1.350	0,04	58,30	2.066,34

Fonte: Elaboração própria com dados do INMETRO, 2014

Tabela 31 – MTD Lavadora de Roupas Automática

Fabricante	Marca	Tipo	Voltagem (V)	Capacidade de lavagem (kg)	Consumo de energia (kWh/ciclo)		Eficiência de lavagem		Consumo de água (l/ciclo)	Tempo de ciclo (min)	Índice	Preço (R\$)
					Água fria	Água quente	Água fria	Água quente				
Whirlpool	Brastemp	Top load	127	11	0,22	2,08	0,88	0,93	133	104	0,020	1.629,00
Whirlpool	Brastemp	Front load	127	11	0,21	1,43	0,92	1,03	82	116	0,016	5.999,00
Electrolux	Electrolux	Lavaseca top load	127	12	0,37	-	1,00	-	144	205	0,031	2.699,00
Samsung	Samsung	Lavaseca front load	220	13	0,27	1,01	0,94	1,00	92	214	0,021	3.198,00

Fonte: Elaboração própria com dados do INMETRO, 2014

Tabela 32 – MTD Ventilador de Teto

Fabricante	Marca	Linha	Voltagem (V)	Vazão média de ar (m³/s)			Potência média absorvida (W)			Consumo de energia (kWh/mês)			Preço (R\$)
				Velocidade alta	Velocidade média	Velocidade baixa	Velocidade alta	Velocidade média	Velocidade baixa	Velocidade alta	Velocidade média	Velocidade baixa	
Poton tecnologia	Keppe motor	Universe	127	2,15	1,39	0,84	22,0	5,5	1,9	0,66	0,17	0,06	435,00

Fonte: Elaboração própria com dados do INMETRO, 2014

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.2.1 GERAÇÃO EÓLICA DISTRIBUÍDA

A aplicação da geração distribuída de energia eólica consiste na conexão de sistemas de geração junto à rede de distribuição. Por essa razão, a modalidade é comumente empregada por meio de sistemas de baixa capacidade nominal. De forma geral, utilizam-se sistemas em torno de 1-3 kW de potência instalada, o que corresponde a um rotor de 2-4 m para uma turbina de eixo horizontal, embora sistemas de maior potência sejam também encontrados, por exemplo, 200 kW. A média de capacidade nominal de turbinas instaladas na China, nos EUA e no Reino Unido, respectivamente, é de 0,5 kW, 1,4 kW e 3,7 kW (GSÄNGER; PITTELOUD, 2014).

Outra forma de retratar esse tipo de empreendimento é pela velocidade de partida da turbina (*cut-in speed*), considerada, de forma geral, como sistemas com necessidade de até 3,1 m/s para entrada em operação (CHRISTINER et al., 2010).

As turbinas eólicas são divididas em dois grupos: turbinas de eixo horizontal (HAWT)²⁴ e turbinas de eixo vertical (VAWT).²⁵ A principal diferença entre os modelos consiste no eixo do rotor da turbina, de rotação vertical ou horizontal. Turbinas de eixo horizontal são mais comuns, sendo a tecnologia mais aplicada em todo o mundo para o aproveitamento da energia dos ventos (Figura 41). Ambos os tipos podem ser utilizados para aplicação em pequena escala.

²⁴ HAWT – Horizontal Axis Wind Turbines.

²⁵ VAWT – Vertical Axis Wind Turbines.

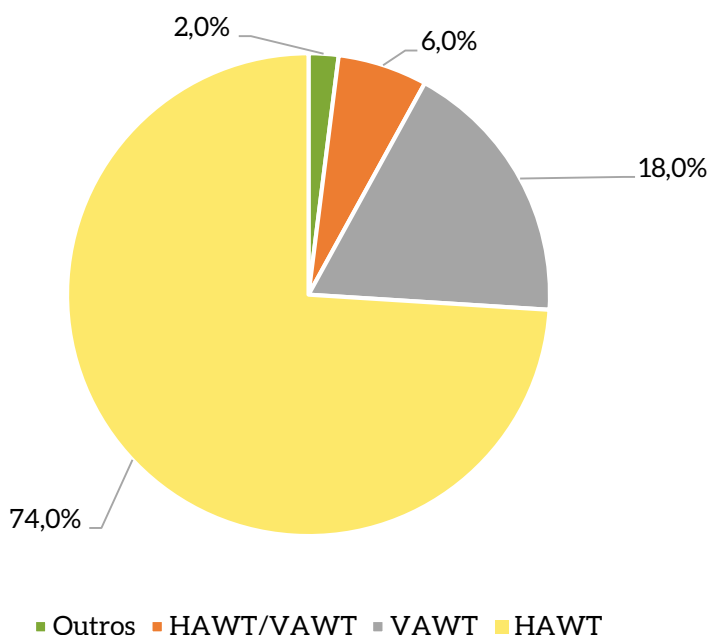


Figura 41 – Produção de Turbinas de Pequeno Porte por Tipo

Fonte: Elaboração própria a partir de GSÄNGER; PITTELOUD, 2014

Nota: Dados coletados de 327 fabricantes de turbinas de pequeno porte

Tipicamente, duas forças atuam sobre as pás de um rotor: forças de sustentação e arraste. Geralmente, rotores operados por forças de sustentação aerodinâmica (*lift*),²⁶ como a turbina de eixo vertical do tipo Darrieus, geram maior potência para uma mesma velocidade de vento, comparada às impulsionadas por forças de arraste (*drag*),²⁷ como a turbina de eixo vertical do tipo Savonius.

Sistemas de eixo horizontal operam pelas mesmas forças, embora rotores desse tipo sejam movidos majoritariamente por forças de sustentação. Essa é a principal razão de a HAWT ser mais eficiente que a VAWT. Entretanto, essa vantagem é somente confirmada para a operação turbina sob um perfil laminar de vento,²⁸ em que o recurso apresenta menor variação (CHINCHILLA et al., 2011). Enquanto turbinas de eixo horizontal apresentam coeficiente de potência²⁹ entre $C_p = 0,40$ e $C_p = 0,50$, turbinas de eixo vertical apresentam valores na faixa de $C_p = 0,25$ e $C_p = 0,40$ (ERIKSSON et al., 2008; POPE et al., 2010).

Outro aspecto desfavorável a turbinas do tipo VAWT é sua dificuldade, em alguns casos, para início de operação de forma autônoma (*self-starting*) em função de seu baixo torque de partida. Assim,

²⁶ Força de sustentação (*lift*) atua de forma perpendicular ao escoamento.

²⁷ Força de arraste (*drag*) atua na mesma direção de escoamento.

²⁸ Perfil laminar é o fluxo em que há uma mínima agitação entre suas diferentes camadas.

²⁹ A eficiência de um rotor é usualmente representada pelo seu coeficiente de potência (C_p), a razão entre a potência extraída pela turbina e a potência total contida no recurso eólico. De acordo com o limite de Betz, o coeficiente de potência (C_p) máximo teórico é igual a 59% (HUTTON, 1967). Em função de perdas devido a aspectos da tecnologia, esse coeficiente nunca é alcançado.

quando necessário, a tecnologia utiliza um gerador para alcançar a velocidade de operação do rotor (CHINCHILLA et al., 2011). Outras diferenças entre as tecnologias são observadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Turbina Eólica de Eixo Vertical versus Horizontal

Características	Eixo Vertical	Eixo Horizontal
Trepidação da torre	Baixo	Alto
Mecanismo de guinada	Não	Sim
Partida própria	Não	Sim
Localização do gerador	Parte inferior	Parte superior
Altura do solo	Baixa	Alta
Área de trabalho da pá	Pequena	Grande
Ruído	Baixo	Relativamente alto
Direção do vento	Independente	Dependente
Obstrução para aves	Pequena	Grande
Eficiência ideal	> 70%	50%-60%

Fonte: Elaboração própria com base em ASLAM BHUTTA et al., 2012

A grande vantagem de turbinas de eixo vertical é a possibilidade de aproveitamento de vento em qualquer direção, sem necessidade do mecanismo de posicionamento azimutal (yaw).³⁰ Essa peculiaridade é de grande valia, sobretudo em ambiente urbano, onde a direção do vento apresenta variação com grande frequência (SMITH et al., 2012). Essa característica impede a perda do vento durante a guinada ou em pequenas rajadas, resultando em melhor aproveitamento do recurso de perfil turbulento com súbitas mudanças de direção e pressão ou em direções distintas. Além do mais, o mecanismo de guinda ou posicionamento azimutal é suscetível a falhas durante a operação, eventualmente incorrendo em maior custo ao sistema e gasto adicional de energia para seu funcionamento.

2.2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA

Alinhado com a Lei nº 10.295, de 2001, ou Lei de Eficiência Energética, a partir da qual o Inmetro passou a fazer exigências acerca do desempenho de produtos, o PBE Fotovoltaico tem marco regulatório vigente na Portaria Inmetro nº 4, de 2011 (INMETRO, 2011). Diversos modelos de módulos e algumas baterias encontram-se cadastrados no programa, entretanto apenas um modelo de inversor. Enquanto para eletrodomésticos a etiquetagem é feita com base em eficiência energética, módulos fotovoltaicos são analisados com base em sua capacidade de gerar energia.

Desde 2005, itens fotovoltaicos são etiquetados com esse propósito, no entanto, à época, exclusivamente para sistemas isolados (GALDINO et al., 2005). Inicialmente, essas especificações eram feitas de forma voluntária. Em 2012, passaram a ser feitas compulsoriamente.

³⁰ O mecanismo de posicionamento azimutal (yaw) ou movimento de guinada encontra-se presente em turbinas de eixo horizontal com a finalidade de posicionamento da turbina em relação à direção de escoamento do vento para maximização de seu aproveitamento.

A etiquetagem tem por objetivo estabelecer regras para módulos, controladores de carga, inversores e baterias. Para adequação à norma supracitada, o fornecedor (fabricante ou importador) deve contratar laboratório de especificação para realização dos ensaios necessários (MOCELIN et al., 2008). A etiquetagem é feita com base na eficiência de conversão do módulo fotovoltaico (Tabela 33). De forma geral, sistemas de maior eficiência são capazes de gerar um dado montante de eletricidade com menor demanda de área utilizada, sendo, assim, bastante relevantes tanto para aplicações centralizadas quanto para geração distribuída.

Tabela 33 – Classe de Etiquetagem PBE de Silício Cristalino

Classe	Eficiência (%)
A	$EE > 13,5$
B	$13,5 > EE > 13,0$
C	$13,0 > EE > 12,0$
D	$12,0 > EE > 11,0$
E	$EE < 11,0$

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Com base na classificação do programa,³¹ observa-se a grande quantidade de módulos do tipo A, isto é, com ótima eficiência segundo a metodologia de classificação do programa (Figura 42). De 267 módulos cadastrados, seis modelos apresentam classificação baixa (classe C) e 15 apresentam classificação muito baixa (classe D).

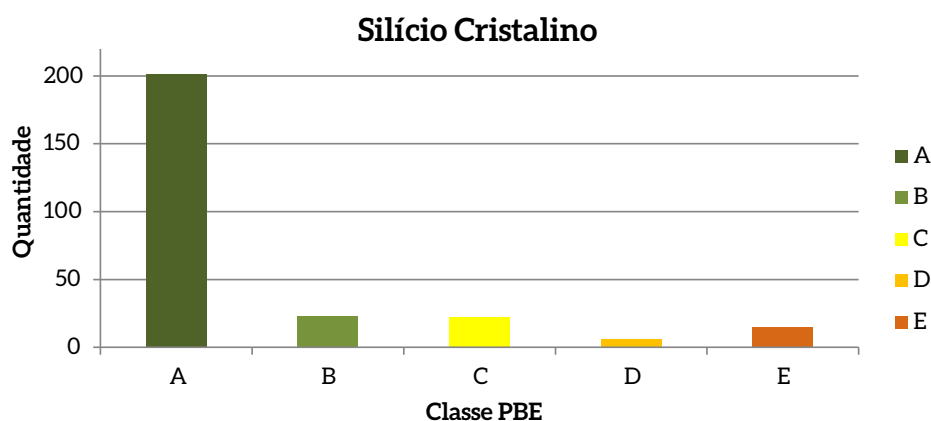


Figura 42 – Classificação PBE do Módulo em função de Sua Eficiência

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Nota-se que grande parte dos equipamentos de bom desempenho se encontra nas maiores faixas de potência nominal. Todos os módulos de baixa eficiência (classe D) têm potência nominal de, no máximo, 140 W-pico, enquanto modelos com capacidade superior a 245 W-pico apresentam alta eficiência de conversão (classe A) (Figura 43).

³¹ Com base em sua última revisão (versão 01/2013), algumas informações podem se encontrar desatualizadas. O banco de produtos atualmente registrados, autorizados para fabricação, importação e comercialização no país encontra-se disponível em <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/regObjetos.asp>.

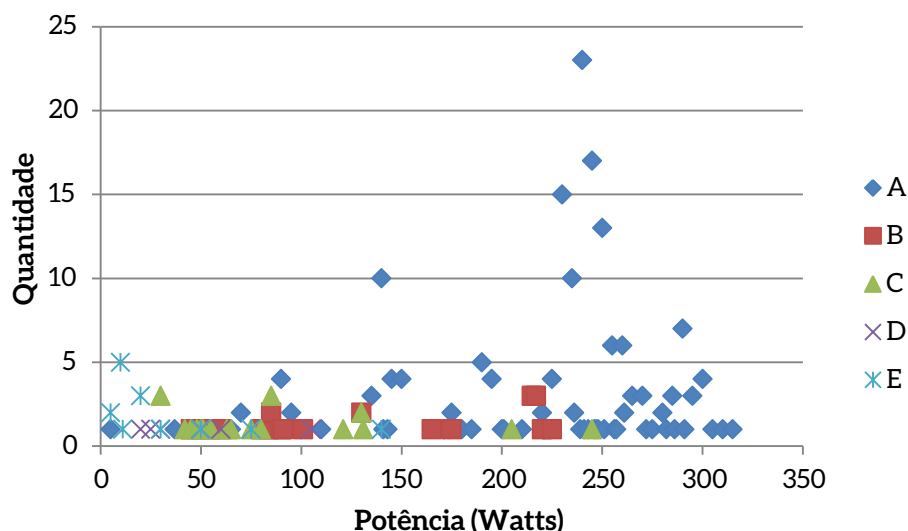


Figura 43 – Módulos por Classe e Potência Nominal

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

Para módulos de filme fino,³² apenas 12 modelos encontram-se cadastrados no PBE. Dado que essa categoria, notoriamente, apresenta menor eficiência de conversão, a classificação do PBE foi concebida de forma diferente (Tabela 34). Dos modelos cadastrados, observam-se: 3 (classe A), 2 (classe B), 3 (classe D) e 4 (classe E).

Tabela 34 – Classe de Etiquetação PBE de Filmes Finos

Classe	Eficiência (%)
A	EE > 9,5
B	9,5 > EE > 7,5
C	7,5 > EE > 6,5
D	6,5 > EE > 5,5
E	EE < 5,5

Fonte: Elaboração própria a partir de INMETRO, 2014

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta também uma série de especificações importantes. A ABNT NBR IEC 62.116/2012 tem por objetivo fornecer um procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores. A norma ABNT NBR 16.149/2013 tem o intuito de caracterizar a interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, fornecendo recomendações específicas. E a norma ABNT NBR 16.150/2013 especifica os procedimentos de ensaio de modo a assegurar que equipamentos utilizados na interface de conexão estejam em conformidade com a ABNT NBR 16.149/2013.

32 O programa não especifica a tecnologia do modelo, apenas a família de filme finos.

2.2.2.1 TECNOLOGIAS DE CÉLULAS FV

Tecnologias de células FV são comumente subdivididas em três categorias, sendo essas células de primeira, segunda e terceira geração. Entende-se por células de primeira geração as células fabricadas de silício cristalino. Células de segunda geração abrangem uma série de materiais inorgânicos, tipicamente aplicados em camadas mais finas que as células de silício cristalino, por isso chamadas de células de filme fino. Células de terceira geração consistem em células que aplicam materiais alternativos e camadas ativas, visando otimizar o desempenho da tecnologia FV. As células atualmente comercializadas pertencem principalmente à primeira e à segunda geração, em que as células de primeira geração respondem por quase 90% do mercado. As células de terceira geração se encontram, na maior parte, em estados de desenvolvimento menos avançados.

2.2.2.2 CÉLULAS DE SILÍCIO CRISTALINO

A primeira geração de células FV é representada por células de *wafer* de silício cristalino (c-Si). Para a aplicação em células FV, o silício precisa ter uma pureza de 99,9999% e deve receber uma dopagem com elementos que provocam a geração de um campo elétrico dentro da célula. No caso de *wafers* de silício, a dopagem ocorre tipicamente com fósforo (P) e boro (B).

Em células modernas de silício cristalino, uma série de camadas funcionais é adicionada para aumentar a eficiência da célula solar, como filmes de passivação e filmes antirreflexivos (Figura 44).

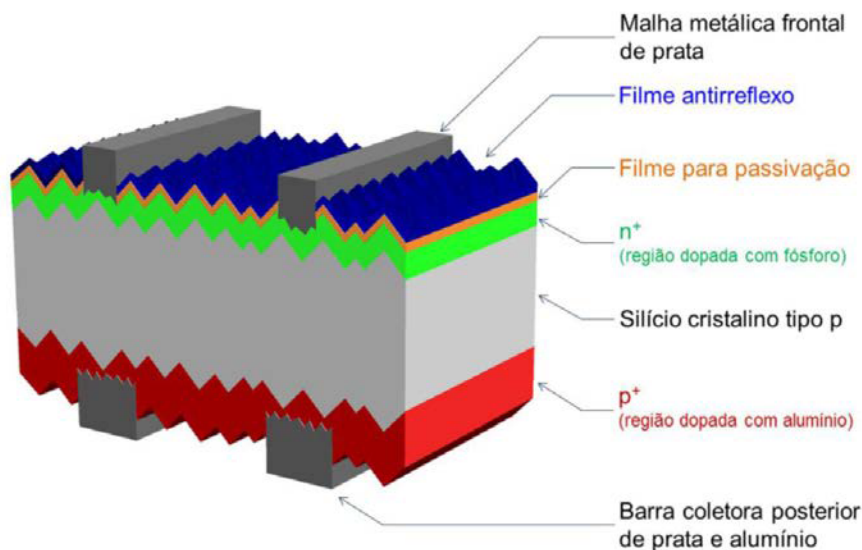


Figura 44 – Estrutura de Célula Cristalina

Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

Módulos de c-Si são divididos em duas categorias: células monocristalinas e células policristalinas. Eles diferem na sua estrutura de cristal e, portanto, no seu processo de produção. A produção de silício monocristalino é mais energointensiva e, portanto, mais cara. Por outro lado, os módulos

fotovoltaicos policristalinos têm eficiências ligeiramente inferiores às dos seus concorrentes monocristalinos. Assim, as duas tecnologias coexistem no mercado e apresentam relações custo-benefício muito próximas. Eficiências de células e módulos comercializadas são indicadas na Tabela 35.

Tabela 35 – Eficiência de Células de Silício Cristalino

Tipo	Eficiência de célula	Eficiência do módulo
Silício monocristalino	16-22%	13-19%
Silício policristalino	14-18%	11-15%

Fonte: Elaboração própria a partir de IRENA, 2013

Estima-se que o máximo de eficiência que pode ser alcançado com células fotovoltaicas de silício cristalino se encontra em torno de 29% (IRENA, 2013). No longo prazo, espera-se que células comerciais de silício monocristalino cheguem a obter eficiências de 25% e células de silício policristalino, 21%. Aproximadamente, 40% da capacidade instalada acumulada consistem de células monocristalinos e 40% de células policristalinos (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.2.3 CÉLULAS INORGÂNICAS DE FILME FINO

Células de materiais inorgânicos de filme fino fazem uso de um leque de materiais semicondutores. Trata-se, geralmente, da combinação de diferentes materiais que podem ser aplicados em camadas mais finas por apresentarem taxas de absorção maiores que as do silício. As camadas apresentam espessuras da ordem de somente 1 μm e diferem nos processos de produção de células de *wafer* de silício. A grande vantagem das células de filme fino se encontra na redução considerável de materiais semicondutores.

As tecnologias mais aplicadas na área incluem células de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) ou micromorfo ($\mu\text{c-Si}$), telureto de cádmio (cadmium-telluride – CdTe) e de combinações de cobre-índio-(gálio)-selênio (copper-indium-(gallium)-diselenide – CI(G)S).

Uma tendência importante nas células de filme fino é a aplicação de heterojunções e junções múltiplas de semicondutores, com várias camadas de semicondutores simples (p.e. a-Si:H) ou mistos (p.e. CuInGaSe). Dessa forma, uma célula FV apresenta vários *energy gaps*³³ e pode absorver uma quantidade maior de fótons.

Na Figura 45, observa-se uma célula com *energy gap* de ~1,4 eV na sua camada inferior de a-Si-Ge:H (absorvendo luz vermelha), um *energy gap* de ~1,6 eV na camada do meio, que é mais pobre em Ge (absorvendo luz verde), e um *energy gap* de ~1,8 eV na camada superior (absorvendo a faixa azul da radiação solar). Dessa forma, obtém-se aproveitamento maior do espectro solar, o que leva a aumento de eficiência da célula.

33 O comportamento de uma célula FV depende fortemente de uma grandeza chamada *energy gap* ou *band gap*. O *energy gap* descreve a diferença do nível energético de elétrons no estado normal e no estado excitado do semicondutor e, portanto, da energia necessária para a excitação do elétron. Essa energia é aportada pela radiação solar. Todavia, somente uma parte da radiação solar pode ser aproveitada, pois a radiação solar consiste em raios eletromagnéticos que abrangem um amplo espectro de comprimentos de onda, e a quantidade de energia transmitida na radiação solar depende do comprimento de onda. Uma célula fotovoltaica pode se aproveitar somente daquela parte da radiação cujo nível energético é maior que o *energy gap*.

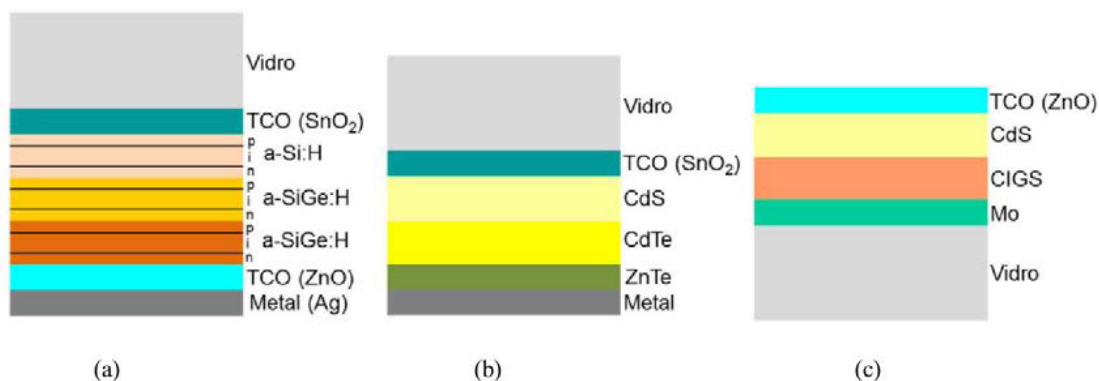


Figura 45 – Cortes de Filme Fino

Nota: (a) célula de a-Si:h/a-SiGe:H com tripla junção; (b) célula de CdTe em heterojunção com CdS; (c) célula de CuInGaSe em heterojunção com Cds

Fonte: CRESESB, 2014

Módulos comercializados alcançam eficiências típicas em torno de 10%. Todavia, esperam-se aumentos de eficiência de até 15% até 2030 via avanços tecnológicos (Tabela 36).

Tabela 36 – Eficiência de Células de Filme Fino (%)

Tipo	2010	2015-2020	2030
a-Si			
Eficiência máxima	10	15	-
Eficiência comercial	4 a 8	10 a 11	13
a-Si/mc-Si			
Eficiência máxima	12 a 13	15 a 17	-
Eficiência comercial	7 a 11	12 a 13	15
CdTe			
Eficiência máxima	17	-	-
Eficiência comercial	10 a 11	14	15
CI(G)S			
Eficiência máxima	20	-	-
Eficiência comercial	7 a 12	15	18

Fonte: Elaboração própria a partir de IRENA, 2013

2.2.2.4 CÉLULAS ORGÂNICAS E DE CORANTES

Células orgânicas (OPV, sigla em inglês para *organic photovoltaic*) e células com corantes (*dye sensitized solar cells* – DSSC) consistem em semicondutores à base de carbono. Tais semicondutores são materiais de baixo custo que combinam características elétricas de semicondutores com propriedades de plásticos comuns como baixa densidade, processabilidade e flexibilidade de síntese (CGEE, 2011).

Os DSSC funcionam por meio de uma reação química de oxidação-redução. Essas células combinam materiais orgânicos e inorgânicos e consistem num líquido eletrólito (geralmente composto de um sal de iodo) enclausurado entre vidros. Elas apresentam como característica boa operação para absorção de radiação difusa. Em laboratório, eficiências de 8% a 12% têm sido atingidas, enquanto módulos fabricados em condições industriais operam com eficiências da ordem de 4%.



Metodologia para caracterização do ano-base

Capítulo

3

3 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO ANO-BASE

Para efeitos das análises e projeções que são objeto deste estudo, considera-se 2010 como ano-base. Por esse motivo, a caracterização desse ano é especialmente importante, pois, a partir dele, serão estabelecidas as evoluções do consumo de energia e emissões associadas, tanto para o cenário REF quanto para os cenários alternativos (BC e BC+I), nos quais medidas que mitigam emissões de GEE serão avaliadas.

3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Devido à falta de informações detalhadas que permitissem boa estimativa de parâmetros de posse e uso de diferentes equipamentos nos setores de edificações, foi necessário ajustar alguns parâmetros a partir de uma metodologia mais agregada. Isso se faz necessário também para que se garanta a consistência entre a soma do consumo energético nos diferentes usos finais com os valores de consumo do BEN para o setor.

Dessa forma, a premissa adotada para calibrar o ano-base é que a demanda de energia usando as abordagens *bottom-up* e *top-down*, quando viáveis, convergiria para o ano 2010. Nesse sentido, o ano-base do setor residencial foi ajustado, partindo de uma estrutura *top-down*, construída com base em dados reportados no BEN quanto ao consumo por fontes energéticas por setor, assim como pela informação de demanda de energia por uso final contida em EPE (2014a).

Uma vez ajustado o modelo *top-down*, calibrou-se o modelo *bottom-up* com o uso de parâmetros de posse, uso, número de residências, eficiência de equipamentos, consumo específico etc. Quando não eram disponíveis valores para os parâmetros do modelo *bottom-up* para o ano-base, fez-se necessário estabelecer algumas premissas, assim como estimar o valor do parâmetro de acordo com metodologias específicas que serão descritas nas próximas seções deste relatório. De qualquer forma, o procedimento metodológico utilizado garantiu uma consistência do modelo detalhado com os dados agregados do BEN.

No que diz respeito aos fatores de emissão, foram utilizados na projeção os valores da Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – TCN (MCTIC, 2016a). Para lenha e carvão vegetal, assumiu-se fator de emissão nulo. No caso do fator de emissão da energia elétrica, para os anos 2010 e 2015, foram utilizados fatores de emissão do sistema interligado nacional (SIN) (MCTIC, 2016b). Para as projeções a partir de 2020, utilizaram-se fatores de emissão provenientes da modelagem integrada dos cenários de emissões do projeto, obtidas do modelo Message-Brasil (MSB8000). Os resultados podem ser vistos na Tabela 37.

Tabela 37 – Fator de Emissão para o Consumo de Eletricidade no Setor de Edificações

Ano	Fator de Emissão
	(tCO ₂ /MWh)
2010	0,05
2015	0,12
2020	0,03
2025	0,10
2030	0,17
2035	0,22
2040	0,25
2045	0,29
2050	0,35

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTIC, 2016b

A seguir, será descrito primeiramente como o consumo total de cada fonte de energia foi alocado segundo os principais usos finais em edificações (metodologia *top-down*). Posteriormente, serão descritos os procedimentos detalhados para calibragem do ano-base (metodologia *bottom-up*). Por fim, a metodologia para projeção da geração distribuída será apresentada separadamente, posto que foi considerado como sendo procedimento metodológico diferenciado.

3.2 AJUSTE DO ANO-BASE PELO MODELO TOP-DOWN

3.2.1 SETOR RESIDENCIAL

Como já comentado na seção 1.1, o setor residencial brasileiro foi responsável pelo consumo energético de 23.562 ktep em 2010 (EPE, 2016). A principal fonte consumida foi a eletricidade, que representou 39% sobre o total, seguida por lenha e GLP (Figura 2). A distribuição em ktep pelas principais fontes energéticas é representada na Tabela 38.

Tabela 38 – Consumo Final de Energia por Fonte do Setor Residencial (2010 em ktep)

Fontes	2010 (ktep)
Gás natural	255
Lenha	7.276
GLP	6.298
Querosene	4
Eletricidade	9.220
Carvão vegetal	509
Total	23.562

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2016

A fim de inferir a demanda de energia residencial por uso final, usou-se a desagregação proposta por EPE (2014a), mostrada na Figura 46.

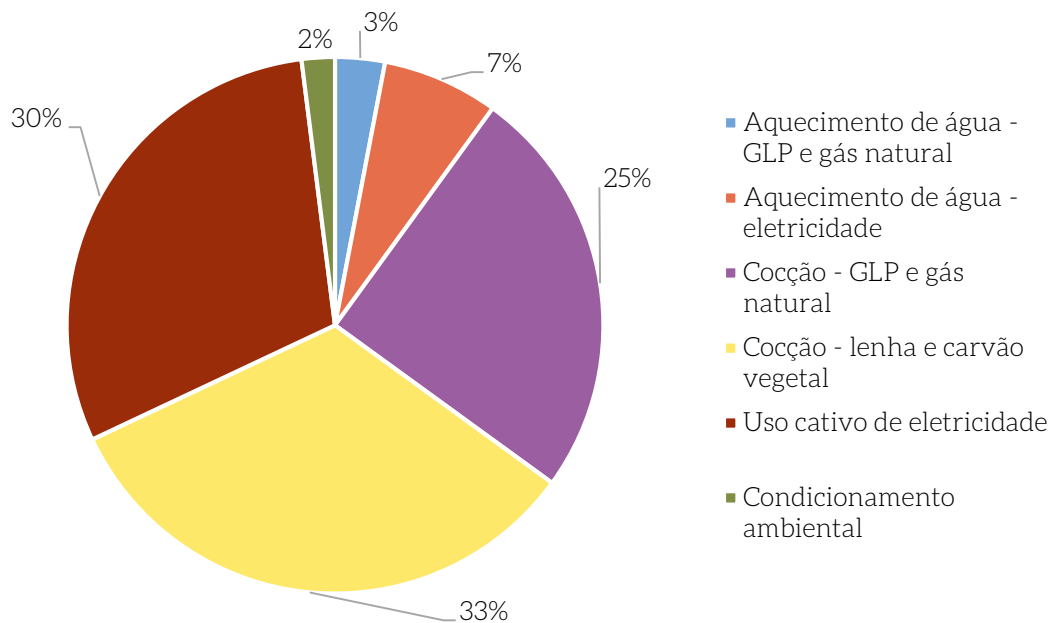


Figura 46 – Demanda de Energia Residencial por Uso Final (%)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2014a

Note-se que, no uso cativo de eletricidade, deve-se incorporar uma desagregação de maior nível com o objetivo de construir o cenário *bottom-up*. Nesse sentido, a fim de conseguir maior nível de detalhamento, foi necessário definir o consumo de energia elétrica residencial por equipamento conforme EPE (2014a) e Procel/Eletrobras (2007a). Assim, foram consideradas as seguintes participações no consumo de energia elétrica por equipamento nas edificações residenciais: geladeira (23%); máquina de lavar (2%); televisor (13%); ar-condicionado (8%); iluminação (16%); aquecimento de água (18%).

De posse das informações anteriores, foi construído o balanço de consumo de energia no setor residencial por fonte e uso, a partir de uma abordagem *top-down*. O resultado é apresentado na Tabela 39.

Tabela 39 – Consumo Final de Energia por Fonte e Uso Final do Setor Residencial (2010 em ktep)

Fonte	Uso	Consumo (ktep)	Sobre o total de energia (%)	Usos elétricos sobre total de energia elétrica (%)
Gás natural	Aquecimento de água	143	0,61	-
GLP	Aquecimento de água	94	0,40	-
Energia elétrica	Aquecimento de água	1.649	7,00	17,9
Gás natural	Cocção	112	0,48	-
GLP	Cocção	6.204	26,33	-
Lenha	Cocção	7.276	30,88	-
Carvão vegetal	Cocção	509	2,16	-
Solar	Cocção	-	0,00	-
Eletricidade (cativa)	Iluminação	1.470	6,24	15,9
Eletricidade (cativa)	Refrigeração	2.113	8,97	22,9
Eletricidade (cativa)	Outros	3.484	14,79	37,8
Eletricidade	Climatização	504	2,14	5,5
Querosene	Iluminação	4	0,02	-
Total		23.562	100,00	100,00

Fonte: Elaboração própria com base em dados de EPE, 2014a; 2015

Nota: * Assumiu-se uma fração solar média de 75% para o Brasil, conforme Cardoso e Nogueira (2011), aplicada sobre o consumo específico da eletricidade

3.3 AJUSTE DO ANO-BASE PELO MODELO *BOTTOM-UP*

Nesta subseção, serão apresentados os principais procedimentos de ajuste do ano-base do modelo *bottom-up*.

3.3.1 POPULAÇÃO E DEMOGRAFIA

As variáveis demográficas são essenciais para a análise, pois interferem diretamente no número de equipamentos considerados no estudo e, consequentemente, no consumo energético total e no nível de emissões de GEE.

Para o ano-base, foram utilizados dados demográficos do IBGE (2013). Três variáveis foram importantes para o ano-base, todas segmentadas por região do Brasil: população, quantidade de domicílios e habitantes por domicílio (sendo a última igual à divisão das duas primeiras). Esses dados podem ser observados na Tabela 40.

Tabela 40 – Dados Demográficos Relativos a População, Domicílios e Pessoas por Domicílio no Brasil e Regiões (2010)

População	Brasil	195.497.797
	Sudeste	82.392.683
	Sul	28.099.409
	Centro-Oeste	14.292.945
	Norte	16.206.409
	Nordeste	54.506.351
Quantidade de domicílios	Brasil	60.028.000
	Sudeste	26.371.500
	Sul	9.145.000
	Centro-Oeste	4.574.000
	Norte	4.352.500
	Nordeste	15.585.000
Pessoas por domicílio	Brasil	3,2
	Sudeste	3,1
	Sul	3,0
	Centro-Oeste	3,1
	Norte	3,7
	Nordeste	3,4

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2013; EPE, 2014a

3.3.2 SETOR RESIDENCIAL

Os usos de energia no setor residencial são diversos. Porém, identificaram-se, conforme a metodologia *top-down* descrita, os principais usos finais: iluminação, climatização, refrigeração, cocção, aquecimento de água e outros usos. Nessa última categoria, existe grande variedade de usos, para os quais se identificaram os principais equipamentos em termos de consumo energético. A seguir, o modelo desagregado *bottom-up* é descrito para cada um desses usos finais.

De forma geral, tal metodologia parte de um arcabouço com três variáveis básicas: posse de equipamentos, eficiência de equipamentos e uso de equipamentos. O primeiro diz respeito a quantos equipamentos existem, em média, por tipo de residência para cada uso final (por exemplo, número de aparelhos de ar-condicionado por residência). O segundo refere-se ao consumo de energia de cada tipo de equipamento (por exemplo, quais tipos de aparelhos de ar-condicionado são esses – janela ou *split* – e quanto consomem por hora ligados).

Finalmente, o uso corresponde a quantas horas, em média, o equipamento fica ligado por dia/ano (por exemplo, quantas horas o ar-condicionado fica ligado). De forma simplificada, sem considerar as nuances de cada uso final, o produto desses três elementos equivale ao consumo de energia de determinado uso final.

Na medida em que a incerteza sobre as informações detalhadas de posse, eficiência e uso é grande, na maioria dos casos, utilizou-se a metodologia *top-down* para calibrar essas informações.

3.3.2.1 ILUMINAÇÃO

O ano-base do uso iluminação foi calibrado usando a Equação 1:

$$CE_{\text{iluminação}} = \sum_{i,j} \text{Residências}_i * \text{Posse média}_{i,j} * \text{Potência}_{i,j} * \text{Horas de uso}_{i,j} \quad (1)$$

Em que,

$CE_{\text{iluminação}}$: representa o consumo de energia referente à iluminação no Brasil;

i : representa as regiões;

j : representa o tipo de lâmpada;

residências_i : é o número de residências por região;

$\text{posse média}_{i,j}$: é o número médio de lâmpadas por tipo, por residência e por região;

$\text{potência}_{i,j}$: é a potência da lâmpada por tipo e por região (W); e

$\text{horas de uso}_{i,j}$: são as horas de utilização da lâmpada (h) por tipo e por região.

3.3.2.1.1 POSSE DE EQUIPAMENTOS

Para obter a posse média de lâmpadas para o ano 2010, partiu-se dos dados obtidos no estudo de Procel/Eletrobras (2007a) que depois foram atualizados com as taxas de importação por tipo de lâmpada reportadas no Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior via *web* do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC, 2014).

A posse média de lâmpadas no Brasil, incandescentes e fluorescentes (compactas e tubulares), foi de quatro por domicílio para o ano 2005, segundo Procel/Eletrobras (2007a).

A Figura 47 mostra que a posse média de lâmpadas fluorescentes (compactas e tubulares) foi maior nas regiões Sul, Norte e Nordeste. Por sua parte, as regiões Sudeste e Centro-Oeste tinham posse média de lâmpadas incandescentes maior do que de lâmpadas fluorescentes.

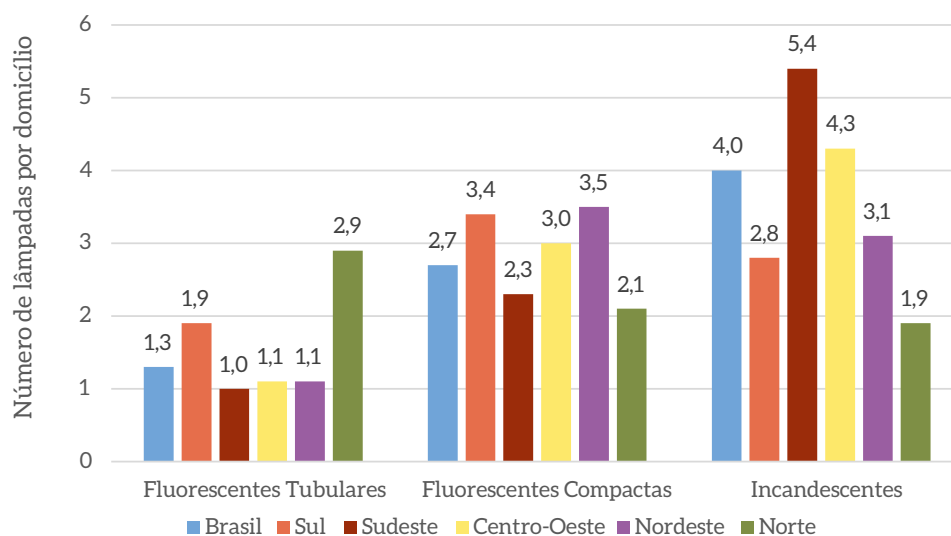


Figura 47 – Posse de Lâmpadas por Domicílio no Brasil e Regiões (2005)

Fonte: Elaboração própria a partir de PROCEL/ELETRONBRAS, 2007a

A fim de estimar a evolução da posse média de lâmpadas em 2010, foram usadas informações da produção nacional, assim como das importações de lâmpadas. Segundo a Associação Brasileira de Indústria de Iluminação (ABILUX, 2014), as indústrias brasileiras fabricam cerca de 1.400.000 peças/ano. Porém, quando comparado com dados de importações de lâmpadas (Figura 48), esse valor é muito pequeno. Portanto, como a produção nacional é inferior em relação às importações, pode-se concluir que quase todas as lâmpadas consumidas no Brasil são importadas.

A Figura 48 mostra a evolução das importações de lâmpadas desde 1999 para cada tipo. Pode-se observar que as lâmpadas fluorescentes têm ganhado participação do mercado importante durante os últimos anos.

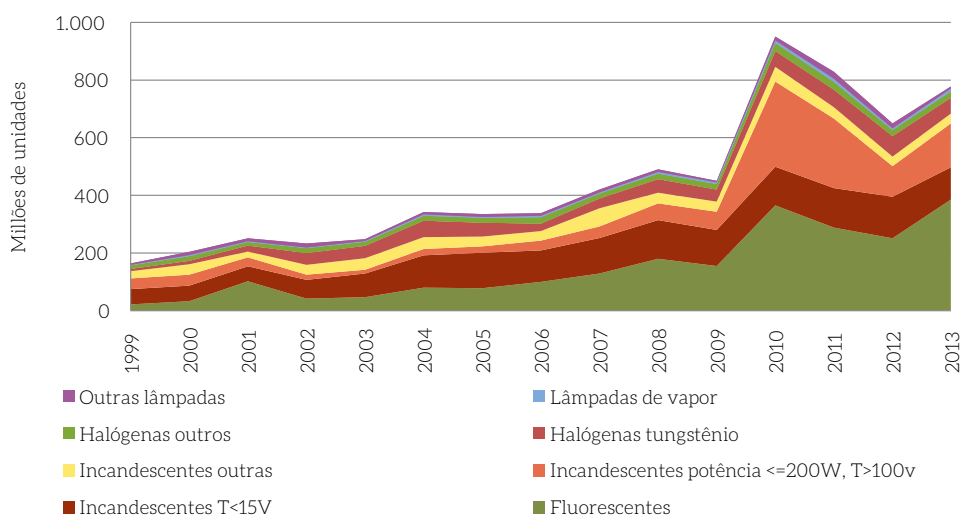


Figura 48 – Unidades Importadas de Lâmpadas para Diferentes Tipos (1999-2013)

Fonte: Elaboração própria com dados de MDIC, 2014; ABILUMI, 2007

Durante a época do apagão (2001), a porcentagem de lâmpadas fluorescentes aumentou, passando a representar 16% nas importações do ano 2000 e 41% em 2001, enquanto as incandescentes tiveram queda. Contudo, para o ano 2013, ainda é significativa a importação desse último tipo de lâmpadas. Entretanto, as Portaria Interministerial MME, MCTI e MDIC nº 1.007/2010 (MME, 2010) estabelece níveis mínimos de eficiência energética pelos quais se espera que esse tipo de lâmpada saia do mercado até o final da década.

A partir dessa informação, pode-se concluir que a importação de lâmpadas incandescentes teve queda de 4% a.a. entre 2005 e 2013, enquanto a importação de lâmpadas fluorescentes aumentou à razão de 9,9% ao ano. Portanto, pode-se verificar uma substituição entre esses dois tipos de tecnologias (Figura 49).

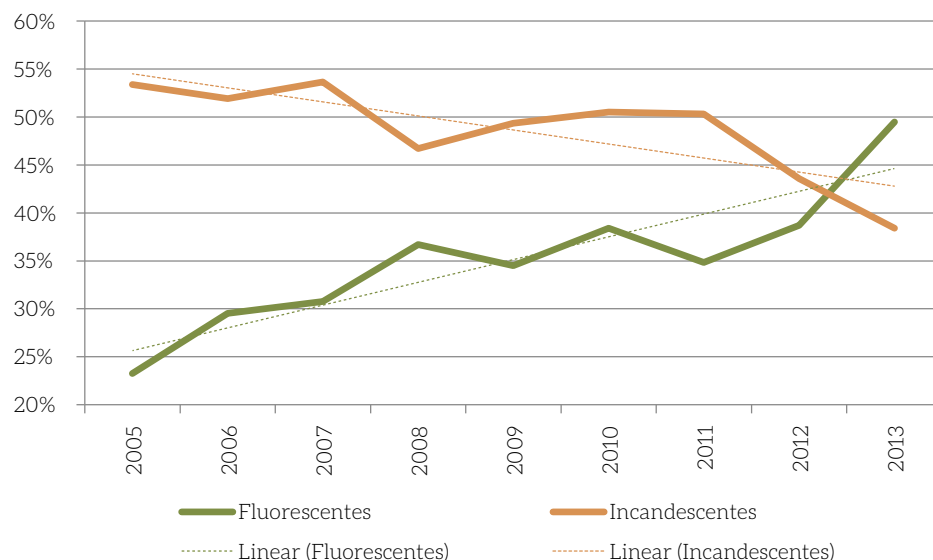


Figura 49 – Taxa de Penetração de Lâmpadas Fluorescentes e Incandescentes

Fonte: Elaboração própria com dados de MDIC, 2014

De posse da taxa de crescimento ou decréscimo da proporção de lâmpadas incandescentes e fluorescentes importadas, foi estimada a posse média por tipo de lâmpada para Brasil e para cada uma das regiões. Nesse sentido, apresenta-se a Tabela 41 com o resultado da metodologia adotada para o ano-base.

Tabela 41 – Estimativa de Posse Média de Lâmpadas por Região no Brasil (2010)

Região	Fluorescentes tubulares	Fluorescentes compactas	Incandescentes
Sudeste	1,27	2,93	4,40
Sul	2,42	4,33	2,28
Nordeste	1,66	4,46	2,52
Norte	3,69	2,67	1,55
Centro-Oeste	1,40	3,82	3,50
Brasil	1,66	3,44	3,26

Fonte: Elaboração própria com dados de MDIC, 2014; PROCEL, 2007

3.3.2.1.2 EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

Quanto ao dado de potência (eficiência da lâmpada) utilizado na Equação 1, foram utilizadas as informações contidas na Tabela 42.

Tabela 42 – Tempo de Utilização por Tipo de Lâmpadas (horas)

Tipo de lâmpada	Fluorescentes tubulares	Fluorescentes compactas	Incandescente
Potência (W)	16	16	60

Fonte: Elaboração própria a partir de GREGGIANIN et al., 2013

3.3.2.1.3 Uso

Por fim, o uso (última variável contida na Equação 1) corresponde às horas de uso das lâmpadas. Cardoso e Nogueira (2008) estimaram o tempo de utilização de lâmpadas por região de acordo com o período climático. A Tabela 43 mostra os resultados do estudo citado, utilizados na análise realizada neste relatório.

Tabela 43 – Tempo de Utilização das Lâmpadas por Região e Período (horas)

Região	Setor residencial	
	Período seco ³⁴	Período úmido
Sul	610	396
Sudeste	605	400
Centro-Oeste	601	403
Nordeste	595	407
Norte	592	409

Fonte: Elaboração própria a partir de CARDOSO; NOGUEIRA, 2008

3.3.2.1.4 CONSUMO DE ENERGIA NO ANO-BASE

Segundo a metodologia apresentada e considerando as informações acima, estimou-se a participação no consumo de energia do uso iluminação por tecnologia utilizada. De acordo com estimativa feita com a aproximação *top-down*, no ano 2010, o consumo energético pela iluminação foi de 1.470 ktep.

É possível perceber na Figura 50 que, no ano-base (2010), as lâmpadas incandescentes ainda eram a tecnologia com a maior parcela no consumo de energia pela iluminação.

³⁴ Além disso, deve-se levar em conta que o ano brasileiro é dividido pela Aneel em dois períodos: seco (maio a novembro), que corresponde a 58,9% do ano, e úmido (dezembro a abril), que corresponde a 41,1% do ano (CARDOSO; NOGUEIRA, 2008).

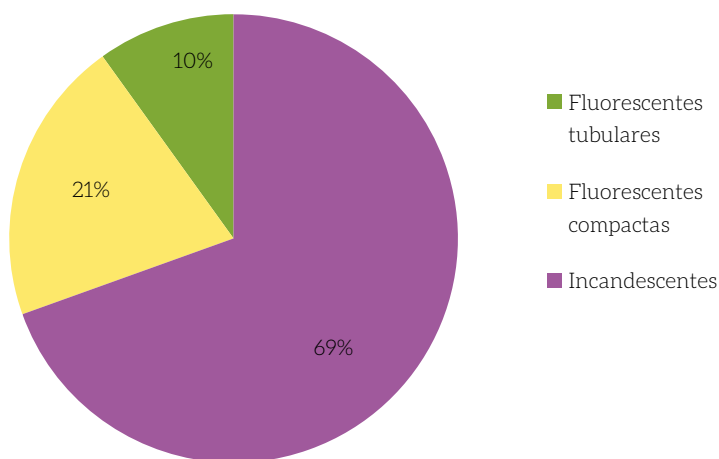


Figura 50 – Distribuição do Consumo de Energia para o Uso Iluminação no Brasil (2010)

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.2 CLIMATIZAÇÃO

Para o uso final de climatização, assumiu-se o uso de aparelhos de ar-condicionado e de ventiladores. No caso dos equipamentos de ar-condicionado, utilizou-se a seguinte Equação 2 para calibrar o ano-base:

$$CE_{\text{arcondicionado}} = \sum_{j,i} \text{residências}_i \cdot \text{posse média}_{i,j} \cdot \text{COP}_j \cdot CT_i \quad (2)$$

Onde,

$CE_{\text{arcondicionado}}$: representa o consumo de energia devido aos equipamentos de ar-condicionado no Brasil;

i : representa a região;

j : representa o tipo equipamento de ar-condicionado (janela ou *split*);

residências_i : é o número de residências por região;

$\text{posse média}_{i,j}$: é o número médio de aparelhos de ar-condicionado por tipo, por residência e por região;

COP_j : é o Coeficiente de performance por tipo de ar-condicionado; e

CT_i : é a Carga térmica por região.

No caso dos ventiladores, a Equação 3 foi utilizada para calibrar o ano-base:

$$CE_{\text{ventiladores}} = \sum_{i,j} \text{residências}_i \cdot \text{posse média}_{i,j} \cdot \text{potência}_j \cdot \text{horas}_i \quad (3)$$

Na qual,

$CE_{\text{ventiladores}}$: representa o consumo de energia devido aos equipamentos dos ventiladores no Brasil;

i : representa a região;

j : representa o tipo equipamento de ventilador (teto ou portátil);

residencias_i : é o número de residências por região;

$\text{posse média}_{i,j}$: é o número médio de aparelhos de ventilador por tipo, por residência e por região;

potência_j : é a potência média (W) do ventilador por tipo; e

horas_j : são as horas de uso (h) do ventilador a potência média em cada região.

Com base nas duas equações acima, estimou-se que o consumo de energia para climatização é dado pela soma dos consumos de ar-condicionado e ventiladores, corrigidos por um fator de simultaneidade, conforme mostra a Equação 4.

$$CE_{\text{climatização}} = (CE_{\text{arcondicionado}} + CE_{\text{ventiladores}}) \cdot fs \quad (4)$$

Em que,

$CE_{\text{climatização}}$: representa o consumo de energia total na climatização no Brasil;

$CE_{\text{arcondicionado}}$: representa o consumo de energia devido aos equipamentos de ar-condicionado no Brasil;

$CE_{\text{ventiladores}}$: representa o consumo de energia devido aos equipamentos dos ventiladores no Brasil; e

fs : representa o fator de simultaneidade, o qual busca corrigir o fato de que nem todos os aparelhos de climatização estão operando simultaneamente.

3.3.2.2.1 POSSE DE EQUIPAMENTOS

Posto que na Pnad não constam informações de posse de ar-condicionado, tanto a posse média do ar-condicionado quanto do ventilador foram calculadas em função das vendas, considerando sucateamento, utilizando a Equação 5.

$$\text{posse}_{t_0} = \frac{\sum_{t=t_0-n,j,i} \text{vendas}_{i,j,t}}{\text{residências}_{i,t_0}} \quad (5)$$

Onde,

posse_{to} : é a posse de equipamentos no ano de análise;

n : é a vida útil dos equipamentos (ar-condicionado ou ventilador); e

$\text{vendas}_{i,j,t}$: são as vendas de equipamentos (ar-condicionado ou ventilador) por tipo e por regiões no ano t .

Segundo NAHB (2007) e Procel/Eletrobras (2007a), 87% dos aparelhos de ar-condicionado pesquisados tinham menos de dez anos, portanto utilizou-se esse valor como vida útil média para os equipamentos de ar-condicionado. Por isso, foi considerada vida útil média dos equipamentos de dez anos (NAHB, 2007).

As vendas por tipo de aparelhos foram obtidas com base na informação reportada por Cardoso et al. (2012) e ABRAVA (2014b). Para a distribuição das vendas por regiões, usou-se como referência a distribuição por posse do Procel/Eletrobras (2007a). Por fim, considerou-se um fator de 65% das vendas reportadas que efetivamente são destinadas para o setor residencial, sendo o restante destinado ao setor comércio, serviços e público, que não conta com sistemas de ar-condicionado centralizado. Isso permitiu ajustar os valores de posse de ar-condicionado no Brasil para os anos 2005 (PROCEL/ELETROBRAS, 2007a) e 2013 (EPE, 2014a). A posse de ar-condicionado resultante para o ano-base por regiões é mostrada na Figura 51.

Equipamentos
por domicílio

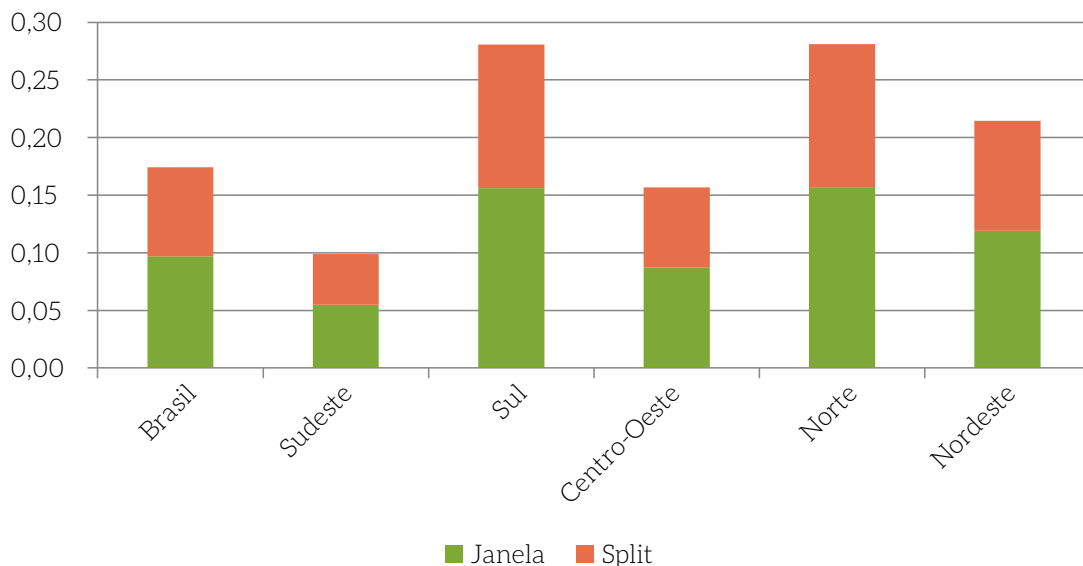


Figura 51 – Posse de Ar-condicionado por Tipo e Regiões Estimada no Brasil (2010)

Fonte: Elaboração própria

No caso de ventiladores, assumiu-se posse por domicílio para o ano-base igual à indicada na pesquisa do Procel/Eletrobras (2007a) para o ano 2005, conforme a Figura 52.

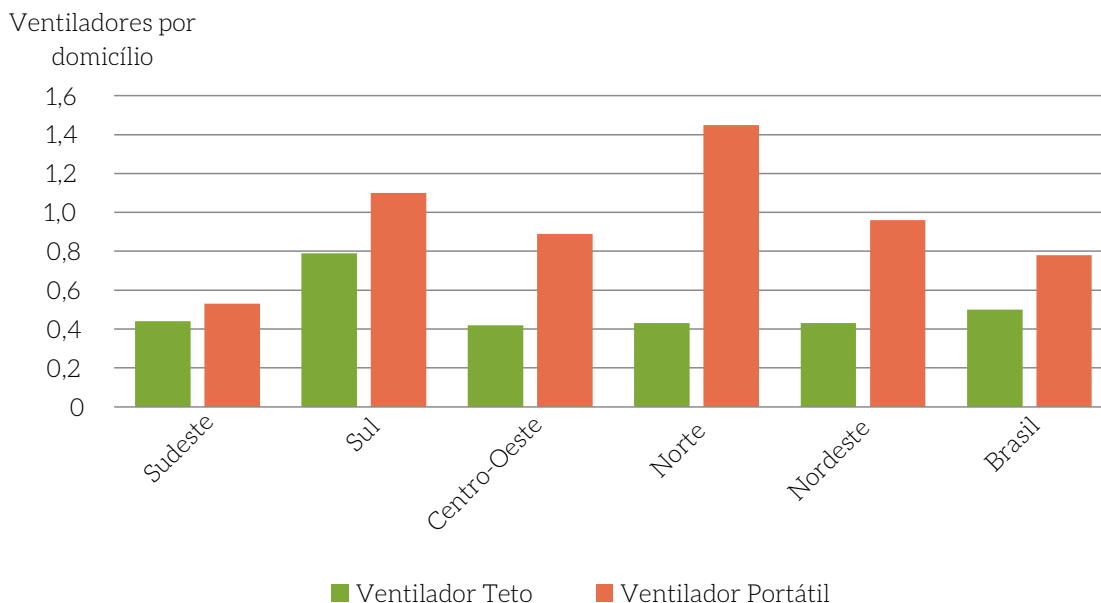


Figura 52 – Posse de Ventilador por Tipo e Regiões Considerada no Brasil (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de PROCEL/ELETOBRAS, 2007a

3.3.2.2.2 EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

Para o cálculo da eficiência através do COP no ano-base, utilizou-se a Equação 6, que considera uma média das eficiências representativas de cada ano ponderada pelas vendas. Assim, foram estimados COP representativos de 3,01 W/W e 3,05 W/W para os equipamentos de ar-condicionado tipo janela e *split*, respectivamente, instalados no Brasil em 2010.

$$COP_{to,j} = \frac{\sum_{t=to-n,j,i} COP_{j,t} \cdot vendas_{i,j,t}}{\sum_{t=to-n,j,i} vendas_{i,j,t}} \quad (6)$$

Onde,

COP é o coeficiente de performance;

$venda_{i,j,t}$: são as vendas de equipamentos de ar-condicionado por tipo e por regiões no ano t .

Para os ventiladores de teto e portátil, utilizou-se potência média de 70 W e 50 W, respectivamente, valores próximos à média de potência dos ventiladores das tabelas Inmetro (2014).

3.3.2.2.3 Uso

No caso de ar-condicionado, o uso na metodologia adotada é dado pela carga térmica, que depende da temperatura exterior. Assim, esse dado considera tanto a eficiência quanto o uso, pois a carga térmica indica quando se liga o aparelho (quando a temperatura exterior ultrapassa um limite estabelecido) e a energia gasta por ele para climatizar o ambiente (dado pelo diferencial de temperatura interior-exterior). Para calcular a carga térmica, foi utilizada a Equação 7 proposta por Cardoso et al. (2012).

$$CT = Q_{Ti} \cdot \sum_{r=1}^n \left(\frac{|T_{amb,r} - T_{intr}|}{T_{amb,s} - T_{ints}} \right) \cdot t_r ; T_{amb,r} \geq T_{sup_i} ; T_{amb,r} \leq T_{inf_i} \quad (7)$$

Em que,

CT: é a carga térmica;

Q_{Ti} : é a capacidade nominal do equipamento (kW);

$T_{amb,r}$: é a temperatura externa real (°C);

$T_{amb,s}$: é a temperatura externa de referência nos testes de desempenho – 35°C (CARDOSO et al., 2012);

T_{intr} : é a temperatura interna real (°C);

T_{ints} : é a temperatura interna de referência nos testes de desempenho – 26,7°C (CARDOSO et al., 2012);

t_r : é a frequência de horas de $T_{amb,r}$ (horas);

T_{sup_i} : é a temperatura limite superior na qual o usuário liga o equipamento; e

T_{inf_i} : é a temperatura limite inferior na qual o usuário liga o equipamento.

Para determinar a capacidade nominal do equipamento representativo, tomou-se como referência o modelo adotado por Cardoso et al. (2012) de 2,6 kW (9.000 BTU). Quanto às temperaturas de uso, segundo Hong (2014), o usuário “austero” nos Estados Unidos liga o ar-condicionado a partir de temperaturas acima de 28°C (T_{sup}). Adotou-se essa referência para as regiões Sudeste e Sul e uma T_{sup} de 29°C para as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste. A temperatura interna real considerada para as regiões Sudeste e Sul foi de 26°C e, no Centro-Oeste, Norte e Nordeste, foi de 27°C.

Por outro lado, na região Sul do país, em algumas temporadas do ano, o equipamento de ar-condicionado funciona como uma bomba de calor. Ainda de acordo com Hong (2014), o usuário “austero” utiliza o ar-condicionado para aquecimento nos EUA em temperaturas abaixo de 18°C. Assume-se, portanto, que se liga o ar-condicionado para aquecimento quando a $T_{amb,r}$ fica abaixo de 15°C (T_{inf}). Para os casos de aquecimento, a T_{intr} considerada é de 18°C.

Com a função de estimar as horas em que os aparelhos são acionados, recopilaram-se temperaturas horárias para um dia típico por mês para as principais regiões urbanas a partir de dados meteorológicos de diferentes aeroportos (24 horas x 12 meses).

Para representar a região Sudeste, consideraram-se as temperaturas da estação Santos Dummont (RJ); para a região Sul, estação Hercílio Luz (SC); para a região Centro-Oeste, estação Brasília (DF); para a região Norte, estação Eduardo Gomes (AM); para a região Nordeste, estação Pinto Martin (CE).

A distribuição das temperaturas horárias por regiões e as T_{sup} de 28°C e T_{inf} de 15°C são mostradas na Figura 53.

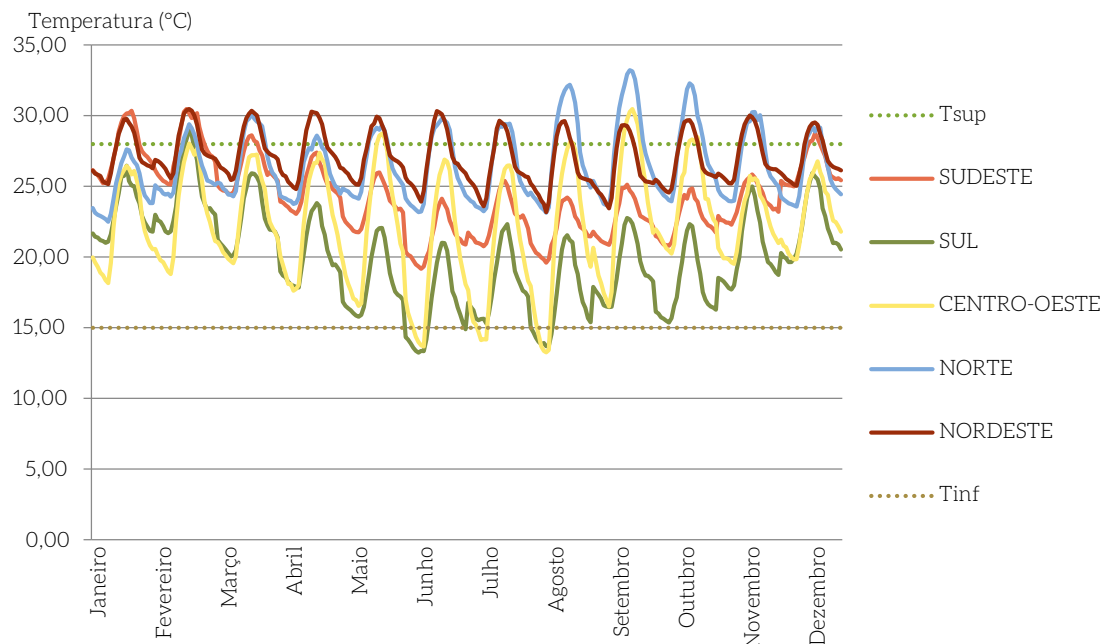


Figura 53 – Temperaturas por Regiões para Dias Típicos (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de REDEMET, 2014

Com base nas temperaturas estimadas por região, calculou-se a carga térmica, cujos resultados são apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 – Carga Térmica Estimada (kWh) por Períodos do Ano e Regiões para Equipamento de Ar-condicionado de 9.000 BTU

Região	Janeiro-Março	Abril-Junho	Julho-Setembro	Outubro-Dezembro	Total
Sudeste	739	0	0	93	832
Sul	195	0	189	0	384
Centro-Oeste	0	186	521	0	708
Norte	220	187	922	539	1.868
Nordeste	510	457	254	347	1.568

Fonte: Elaboração própria

Para o cálculo de horas de funcionamento de ventiladores, assumiu-se que são ligados quando a temperatura exterior supera 29°C (T_{sup}). As horas estimadas são mostradas na Tabela 45.

Tabela 45 – Tempo de Utilização (horas) por Períodos do Ano e Regiões por Ventilador

Região	Janeiro-Março	Abril-Junho	Julho-Setembro	Outubro-Dezembro	Total
Sudeste	420	0	0	0	420
Sul	90	0	0	0	90
Centro-Oeste	0	0	184	0	184
Norte	270	243	736	521	1.770
Nordeste	570	516	337	429	1.852

Fonte: Elaboração própria

Finalmente, para ajustar a modelagem *bottom-up* com os resultados *top-down* para climatização no setor residencial no ano-base, utilizou-se fator de simultaneidade (f_s) de 0,8 para representar que os aparelhos de climatização não são ligados ao mesmo tempo, caso haja os dois equipamentos.

3.3.2.2.4 CONSUMO DE ENERGIA NO ANO-BASE

Os resultados do consumo energético para climatização – ar-condicionado e ventiladores – no ano-base são demonstrados na Figura 54 e na Figura 55, respectivamente. Portanto, verifica-se que o consumo total com climatização é de 504 ktep em 2010.

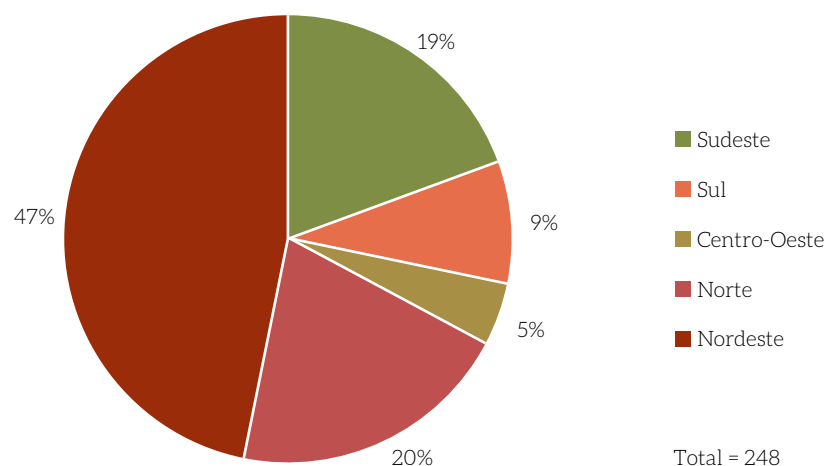


Figura 54 – Consumo de Energia do Uso e Ar-condicionado por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

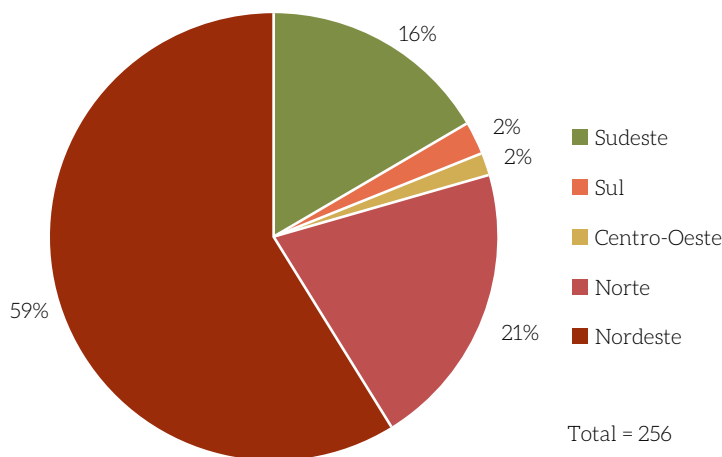


Figura 55 – Consumo de Energia do Uso de Ventiladores por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.3 REFRIGERAÇÃO

Na refrigeração, consideraram-se dois tipos gerais de uso: geladeiras e *freezers*. O ano-base do uso de refrigeração foi calibrado usando as equações 8 e 9, para geladeiras e *freezers*, respectivamente:

$$CE_{geladeira} = \sum_{i,j} residências_i \cdot posse\ média_{i,j} \cdot \%participação_j \cdot volume_j \cdot CEV_j \quad (8)$$

Em que,

$CE_{geladeira}$: representa o consumo de energia pelas geladeiras no Brasil;

i : representa a região;

j : representa o tipo geladeira;

$residências_i$: é o número de residências por região;

$posse\ média_{i,j}$: é o número médio de geladeiras por tipo, por residência e por região;

$\%participação_j$: é a participação nas geladeiras instaladas de cada tipo de geladeira;

$volume_j$: é o volume em litros por tipo de geladeira; e

CEV_j : é o consumo específico de energia por volume (kWh/L) segundo o tipo de geladeira.

$$CE_{freezer} = \sum_i \text{residências}_i \cdot \text{posse média}_{i,j} \cdot \text{volume}_j \cdot CEV_j \quad (9)$$

Na qual,

$CE_{freezer}$: é o consumo de energia pelos *freezers* no Brasil, i é a região;

i : representa a região;

j : representa o tipo de *freezer*;

residências_i : é o número de residências por região;

$\text{posse média}_{i,j}$: é o número médio de *freezers* por tipo, por residência e por região

volume_j : é o volume em litros por tipo de geladeira;

CEV_j : é o consumo específico de energia por volume (kWh/L) segundo o tipo de *freezer*.

Com base nessas duas tipologias de uso, o consumo total de energia para refrigeração é dado pela Equação 10.

$$CE_{refrigeração} = CE_{geladeira} + CE_{freezer} \quad (10)$$

Onde,

$CE_{refrigeração}$: é o consumo de energia total no uso de refrigeração;

$CE_{geladeira}$: representa o consumo de energia pelas geladeiras no Brasil; e

$CE_{freezer}$: é o consumo de energia pelos *freezers* no Brasil.

3.3.2.3.1 POSSE DE EQUIPAMENTOS

A posse de geladeiras e *freezers* para o ano-base foi obtida a partir de IBGE (2011) e IBGE (2012b), respectivamente (Figura 56 e Figura 57).

Domicílios atendidos

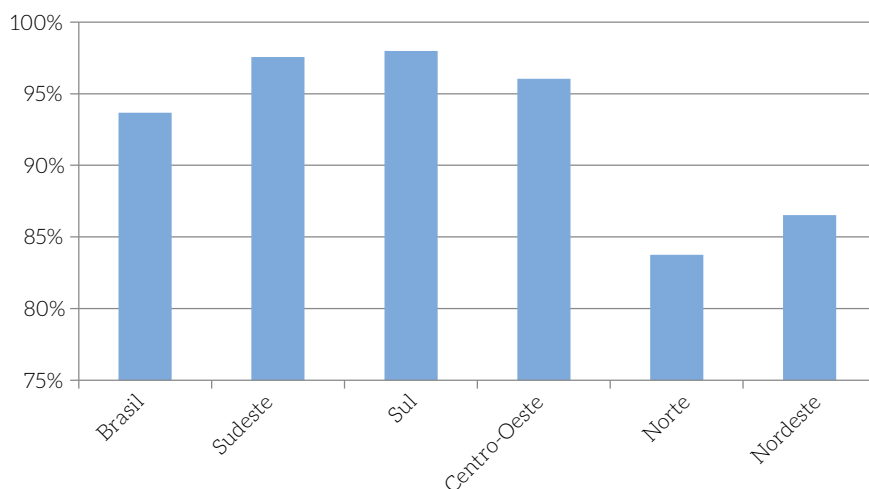


Figura 56 – Posse de Geladeiras por Regiões e no Brasil no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2011

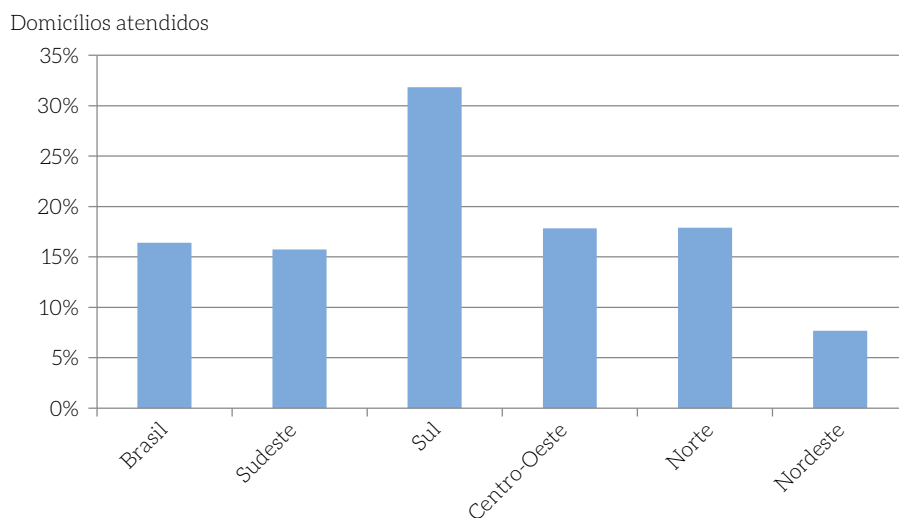


Figura 57 – Posse de Freezers por Regiões e no Brasil no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2012b

Para o caso das geladeiras, adotaram-se dois tamanhos distintos, utilizando como critério o volume: 250 L e 500 L. Isso se fez com o objetivo de representar a hipótese de que, com o tempo, o aumento da renda das famílias levaria ao uso de geladeiras de maior volume (como nos EUA). Ao mesmo tempo, esse incremento de volume exigiria maior consumo de energia por geladeira.

A Figura 58 mostra a relação entre o volume e o consumo de energia de geladeiras, segundo padrões nacionais e internacionais.

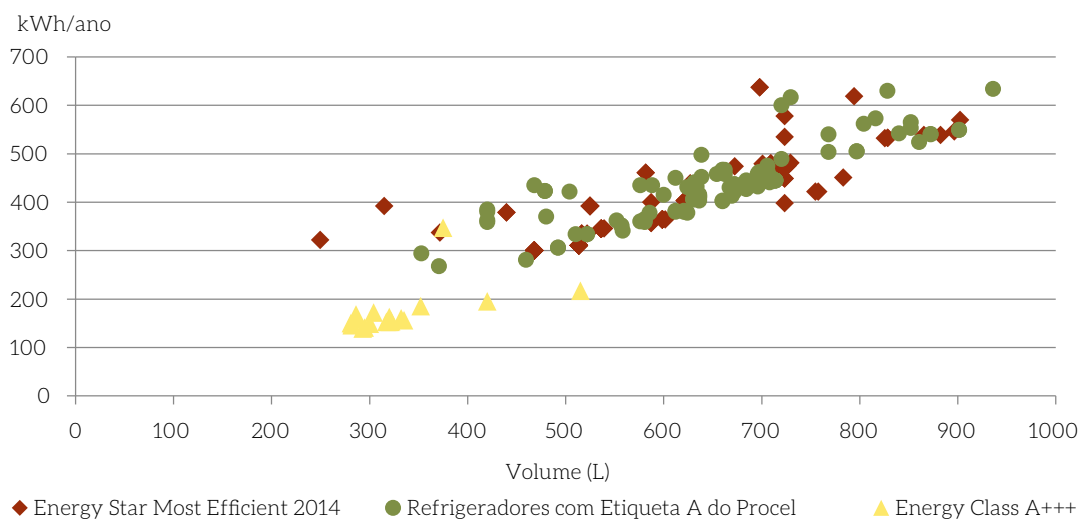


Figura 58 – Consumo de Energia versus Volume para Diferentes Geladeiras com Etiquetagem de Maior Eficiência nos EUA, Brasil e UE

Fonte: Elaboração própria a partir de ENERGY STAR, 2014a; INMETRO, 2014; TOPTEN.EU, 2015

Na medida em que não há informações detalhadas sobre a composição da frota nacional de geladeiras por tamanho, a variável (por tipo de geladeira) foi utilizada como variável de ajuste para calibração do ano-base. Esse ajuste resultou em 87% de participação das geladeiras de 250 L e 13% de participação das geladeiras de 500 L.

No caso dos *freezers*, tomou-se só um tipo de modelo representativo, sendo este o de 200 L. Esse tamanho foi escolhido com base na maior disponibilidade de *freezers* nas tabelas do Inmetro (2014).

3.3.2.3.2 USO E EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

A variável “uso” não se aplica bem ao caso da refrigeração, na medida em que, em sua maioria, os aparelhos de geladeira e *freezer* permanecem ligados constantemente. Dessa forma, a eficiência do equipamento indica o quanto se gasta de energia por período de tempo, assumindo que os equipamentos estão ligados.

Para o consumo específico de energia por volume (kWh/L-ano), tomou-se como referência o valor de 1,3 kWh/L-ano para uma geladeira representativa, no Brasil, de uma porta, conforme reportado por Melo e Jannuzzi (2013).

Para *freezers*, na escolha do consumo específico de energia por volume, utilizou-se como critério a eficiência média dos *freezers* com selo B das tabelas do Inmetro (2014), resultando em valor de aproximadamente 2 kWh/L-ano.

3.3.2.3.3 CONSUMO DE ENERGIA NO ANO-BASE

Os resultados do consumo energético pelas geladeiras e *freezers* para o ano-base são observados na Figura 59 e na Figura 60, respectivamente. A Figura 61 apresenta o consumo de energia total da refrigeração em residências no Brasil por regiões, dado pela soma dos consumos de energia de geladeiras e *freezers* no setor residencial. Observa-se que o consumo de energia por refrigeração totaliza 2.113 ktep.

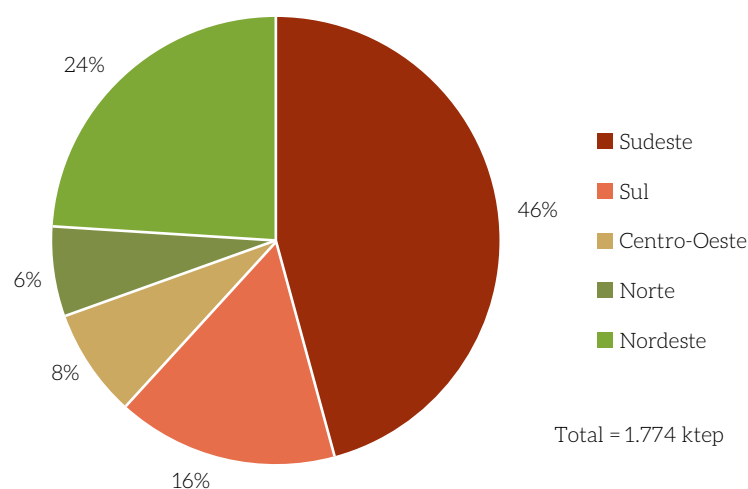


Figura 59 – Consumo de Energia das Geladeiras por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

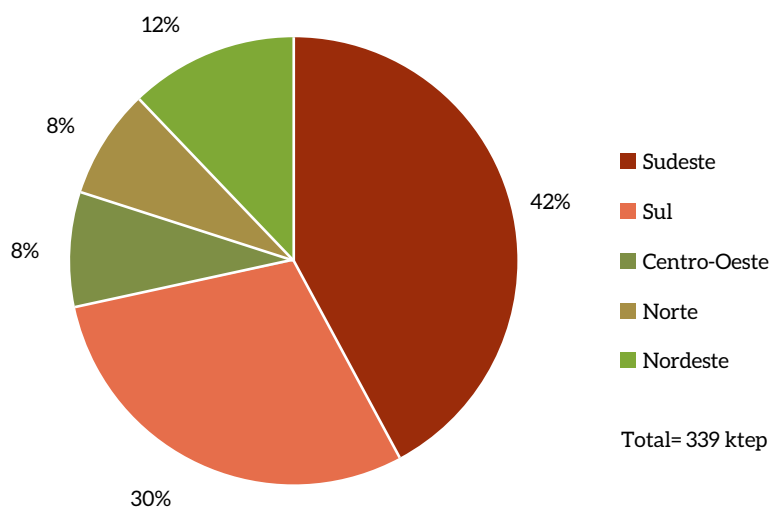


Figura 60 – Consumo de Energia dos Freezers por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

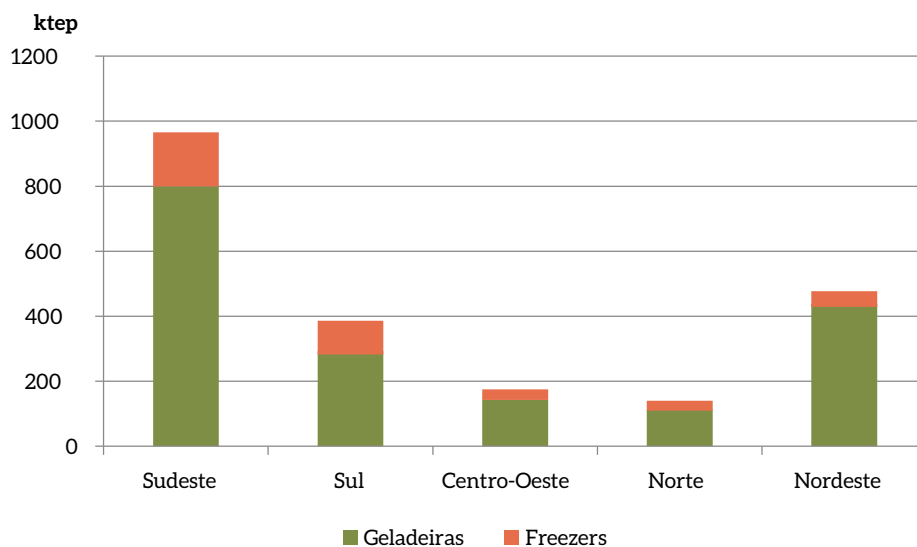


Figura 61 – Consumo de Energia Total no Uso de Refrigeração por Regiões no Brasil no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.4 Cocção

Da mesma forma que nos demais usos, o consumo de energia para a cocção no Brasil foi calibrado partindo-se da premissa de que as demandas de energia calculadas pelas abordagens *bottom-up* e *top-down* devem convergir para o mesmo valor no ano-base. Seguindo essa linha, o cálculo via abordagem *bottom-up* foi realizado segundo a Equação 11.

$$CE_{cocção_i} = \sum_i \% \text{ energético}_i \cdot \frac{\text{habitantes}}{\text{residência}} \cdot \frac{\text{tep}_i}{\text{habitante}} \cdot \text{residências} \quad (11)$$

Em que,

$CE_{cocção_i}$: representa o consumo de energia destinado a cocção no Brasil;

i : representa os energéticos utilizados na cocção (carvão vegetal, lenha, gás natural e GLP);

$\%energético_i$: representa a penetração do energético i nos domicílios; e $tep_i/habitante$: é um coeficiente de consumo específico de energia por habitante (para cada energético).

3.3.2.4.1 POSSE DE EQUIPAMENTOS

A participação de cada energético na cocção foi obtida na Pnad (IBGE, 2010; 2012a). Contudo, a Pnad não é realizada nos anos em que se realiza o Censo, o que gera uma lacuna de dados em 2010. Para contornar essa indisponibilidade, utilizaram-se os dados das Pnad referentes aos anos de 2009 e 2011 e admitiu-se que o ano 2010 teria comportamento próximo à média aritmética desses dois anos. Os dados extraídos da pesquisa e os valores utilizados em 2010 estão ilustrados na Tabela 46.

Tabela 46 – Posse de Fogão e Energéticos Utilizados na Cocção (2009-2011 em %)

Dado	2009	2010	2011
Nº de domicílios que possuem fogão	97,3	97,5	97,7
Combustível utilizado no fogão			
GLP	92,4	92,9	93,4
Gás natural	2,2	2,2	2,5
Lenha	4,6	4,0	3,4
Carvão vegetal	0,8	0,8	0,7
Energia elétrica	-	-	-
Outro combustível	-	-	-

Fonte: Elaboração própria com base em dados de IBGE, 2012a; 2010

3.3.2.4.2 USO E EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

No caso de cocção, a variável uso está embutida no consumo específico, pois este indica quanto se gasta de energia em cocção por habitante por período de tempo ($tep_i/habitante$). Apesar de haver valores indicados na literatura para o uso por pessoa de determinados energéticos na cocção, optou-se por utilizar essa variável para calibrar o modelo. Isso significou realizar o caminho inverso: ao invés de partir de dados da literatura para estabelecer o valor do consumo específico por energético, essa variável foi calculada com base no modelo proposto para então ser comparada aos valores de referência.

Rearranjando os termos da Equação 11 e utilizando-se o consumo energético *top-down* para calibrar o modelo *bottom-up*, tem-se a percepção exata do cálculo realizado – Equação 12.

$$\frac{tep_i}{habitante} = \frac{CE_{top-down_i}}{\% energético_i} \cdot \frac{1}{\frac{habitantes}{residência}} \cdot \frac{1}{residências} \quad (12)$$

Os valores calculados para o consumo específico de cada energético estão dispostos na Tabela 47.

Tabela 47 – Consumo Específico *Per Capita* na Cocção por Energético (2010)

Energético	tep/hab.ano	MJ/hab.dia
Gás natural	0,027	3,1
Lenha	0,958	109,8
GLP	0,036	4,1
Carvão vegetal	0,355	40,7

Fonte: Elaboração própria

O estudo de Schaeffer et al. (2003) afirma que, no período de 1975 a 2000, não houve grandes variações no consumo de GLP por domicílio no Brasil, mantido aproximadamente igual a 12 kg/domicílio/mês (aproximadamente 5 MJ/dia por pessoa).

Para a lenha, o valor levantado no estudo é da ordem de 44 MJ/dia. Por outro lado, WEC e FAO (1999) afirmam que, em sistemas modernos de cocção (gás natural e GLP), consome-se de 2 a 3 MJ/dia por pessoa. Para outros sistemas (carvão vegetal e lenha), a faixa de consumo diário *per capita* seria de 11,5 a 49 MJ/dia.

Nota-se, portanto, que, à exceção da lenha, os demais consumos específicos estão em linha com a literatura sobre o tema. Não obstante, o consumo de lenha para cocção ajustado segundo a metodologia aqui apresentada é consistente com dados do BEN, em cuja base de dados este trabalho se baseia.

Alguns estudos afirmam que a estimativa no consumo de lenha no setor residencial do BEN é superestimada, o que explicaria a discrepância do consumo específico aqui estimado com base no BEN com os valores de literatura. Ainda assim, optou-se por manter consistência com a base de dados do BEN.

3.3.2.4.3 CONSUMO DE ENERGIA NO ANO-BASE

Com as informações apresentadas anteriormente, o consumo de energia para cocção totaliza 14.101 ktep, divididos conforme apresentado na Figura 62. A lenha é o principal energético consumido, devido principalmente à ineficiência inerente à sua utilização. Em segundo lugar, encontra-se o GLP (gás de botijão), devido à sua alta penetração nos domicílios brasileiros. Carvão vegetal e gás natural (gás canalizado) têm participação residual.

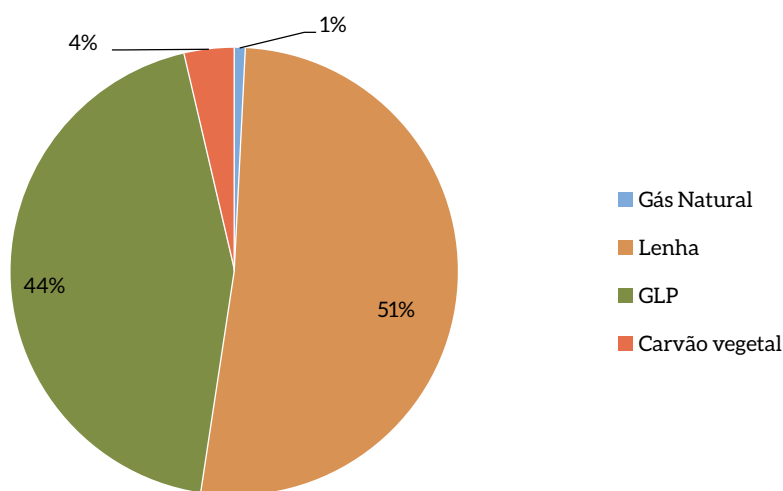


Figura 62 – Participação dos Energéticos no Consumo de Energia da Cocção no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.5 AQUECIMENTO DE ÁGUA

O cálculo do consumo energético para aquecimento de água baseou-se em estrutura semelhante à da cocção, conforme a Equação 13.

$$CE_{aq. \text{ água}_i} = \sum_i \% \text{ energético}_i \cdot \frac{\text{habitantes}}{\text{residência}} \cdot \frac{tep_i}{\text{habitante}} \cdot \text{residências} \quad (13)$$

Onde,

$CE_{aq. \text{ água}_i}$: representa o consumo de energia destinado ao aquecimento de água no Brasil;

i : representa os energéticos utilizados (no caso do aquecimento de água, as possíveis fontes foram eletricidade, gás natural, GLP e solar);

$\% \text{ energético}_i$: representa a penetração do energético i nos domicílios; e $tep_i/\text{habitante}$: é um coeficiente de consumo específico de energia por habitante (para cada energético).

3.3.2.5.1 POSSE DE EQUIPAMENTOS

Devido à indisponibilidade de informações detalhadas dos energéticos utilizados no aquecimento de água, o presente estudo baseou-se principalmente em duas fontes de informação. A primeira foi o estudo conduzido por Procel/Eletrobras (2007a), em que tal característica foi levantada em nível regional, para 2005. Os dados levantados por esse estudo podem ser observados na Tabela 48.

Tabela 48 – Participação das Fontes de Energia no Aquecimento de Água por Região do Brasil (2005 em %)

Fonte Energética	Não Aquece	Solar	Gás Natural	GLP	Eletricidade
Sudeste	1,8	0,6	3,9	2,8	90,9
Sul	0,1	0,0	0,8	0,3	98,8
Nordeste	51,4	0,0	17,2	0,0	31,4
Norte	93,3	0,0	0,0	2,4	4,3
Centro-Oeste	51,4	0,7	0,4	0,0	87,5
Brasil	18,6	0,4	3,5	2,5	75,0

Fonte: Elaboração própria com dados de PROCEL/ELETRONBRAS, 2007a

A segunda fonte foi EPE (2014a), a qual reúne dados em nível nacional referentes a 2013: chuveiro elétrico (69,5%); aquecimento solar (4,1%); gás natural (3,5%); outras fontes³⁵ (2,0%); e sem aquecimento (20,9%). Os anos de 2006 a 2012, inclusive o ano-base de 2010, foram interpolados linearmente entre os valores dessas duas referências. Os resultados para o ano-base podem ser observados na Tabela 49.

Tabela 49 – Participação dos Energéticos no Aquecimento de Água (2010 em %)

Fonte Energética	2010 (%)
Eletricidade	71,6
Não aquece	20,0
Gás natural	3,5
Solar	2,7
GLP	2,2

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.5.2 USO E EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

Mais uma vez, a variável de consumo específico (tep/habitante) foi utilizada como ajuste, da mesma forma que na cocção. Os resultados da aplicação da metodologia proposta para calcular a variável de ajuste são encontrados na Tabela 50.

Tabela 50 – Consumo Específico Per Capita no Aquecimento de Água por Energético (2010)

Energético	tep/hab.ano	MJ/hab.dia
Gás natural	0,021	2,44
GLP	0,022	2,55
Eletricidade	0,012	1,39
Solar *	0,003	0,347

Fonte: Elaboração própria

Nota: * Assumiu-se uma fração solar média de 75% para o Brasil, conforme Cardoso e Nogueira (2011), aplicada sobre o consumo específico da eletricidade.

35 Assumiu-se que "outras fontes", no estudo da EPE (2014a), seria GLP.

Para validar o valor calculado para o consumo *per capita* de cada energético no aquecimento de água, recorreu-se a dados do PBE (INMETRO, 2014). O PBE apresenta vazões de gás natural e GLP para quatro selos, ordenados de acordo com o rendimento do equipamento,³⁶ cuja média de consumo específico está na Tabela 51.

Alguns comentários devem ser feitos. Primeiramente, foi calculada a média de cada selo do PBE. Em segundo lugar, foi estabelecida uma duração média de banho quente equivalente a dez minutos, o que pode ser superestimado, já que, na pesquisa realizada por Procel/Eletrobras (2007a), cerca de 50% dos entrevistados afirmaram demorar menos de dez minutos no banho. Por último, deve-se levar em conta que o PBE fornece apenas os consumos máximos dos aquecedores cadastrados e considerou-se que, nos dez minutos de banho, seria utilizada água quente na vazão máxima do aquecedor. Os valores constantes da Tabela 14 devem ser observados, portanto, como limites superiores para a estimativa realizada.

Tabela 51 – Média de Consumo Per Capita de Aquecedores de Água por Selo

Selo	Gás natural	GLP	Unidade
A	22,66	22,88	MJ/dia/pessoa
B	16,44	14,31	MJ/dia/pessoa
C	15,22	18,72	MJ/dia/pessoa
D	17,29	-	MJ/dia/pessoa

Fonte: Elaboração própria com base em INMETRO, 2014

Quanto ao consumo de eletricidade no aquecimento de água, a variável utilizada para avaliar a adequação do modelo *bottom-up* ao *top-down* foi o tempo de banho. A utilização de chuveiros elétricos apresenta perfis diferenciados ao redor do Brasil, tanto em termos de potência dos equipamentos quanto em termos de posse. A título de exemplo, segundo dados do Procel/Eletrobras (2007a), cerca de 99% das residências da região Sul têm chuveiro elétrico, enquanto menos de 5% das residências da região Norte o possuem. Quanto à potência, foi adotada a distribuição de potência por região sugerida pelo PBE e já indicada na Tabela 14.

Com base nessas informações, calculou-se a participação de cada região no consumo de eletricidade para aquecimento de água, diferenciando-se também o período em que os chuveiros estariam operando nos modos “verão” e “inverno” (assumiu-se que, durante três meses do ano, ele seria utilizado no modo “inverno” e o restante, no “verão”).

Para que os consumos de eletricidade *bottom-up* e *top-down* de chuveiros elétricos se igulassem no ano-base, a duração média de um banho utilizando somente água quente seria de aproximadamente cinco minutos. Como aproximadamente metade dos brasileiros utiliza menos de dez minutos no banho (PROCEL/ELETROBRAS, 2007a) e nem sempre utiliza água quente (por exemplo, na região Norte, mesmo nos domicílios que possuem chuveiro elétrico, é de se esperar que eles não sejam utilizados todos os dias), pode-se inferir que os valores calculados estejam adequados.

36 Como a classificação do Inmetro é baseada em rendimento, um aquecedor de água de maior rendimento e maior vazão tem classificação mais favorável que um aquecedor de menor rendimento e menor vazão, ainda que o segundo aquecedor resulte em um consumo *per capita* menor.

3.3.2.5.3 CONSUMO DE ENERGIA NO ANO-BASE

A eletricidade é a principal fonte de energia utilizada no aquecimento de água, tendo sido responsável por 1.649 ktep do total consumido para esse fim (Tabela 39). Os demais 12% foram divididos entre gás natural (7%) e GLP (5%). Essas informações em percentual são apresentadas na Figura 63.

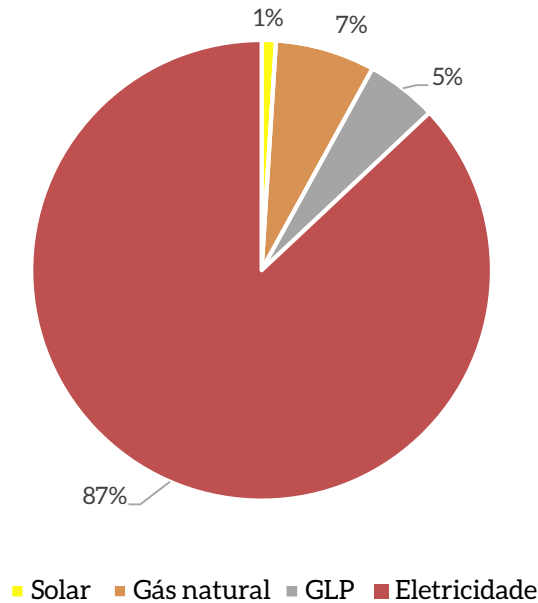


Figura 63 – Participação dos Energéticos no Consumo de Energia do Aquecimento de Água no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

Em termos regionais (Figura 64), o Sudeste foi o responsável pela maior parcela do consumo energético no aquecimento de água, seguido pelo Sul. O Norte, devido à reduzida quantidade de domicílios dotados de equipamentos para aquecer água, é a região de menor consumo.

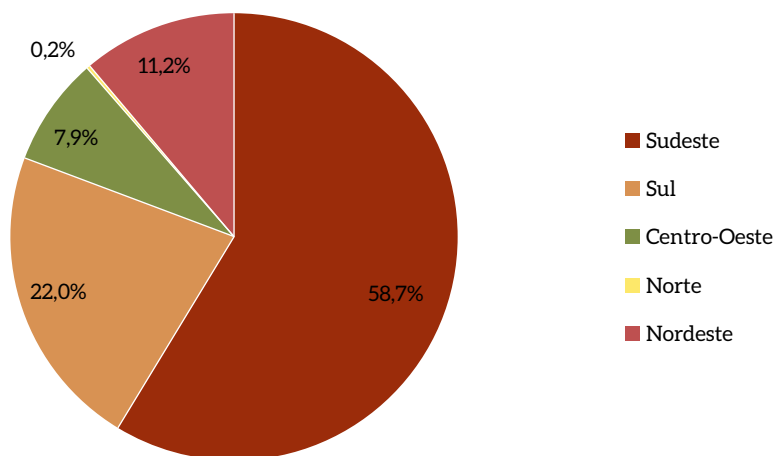


Figura 64 – Participação das Regiões no Consumo de Energia do Aquecimento de Água no Setor Residencial (2010)

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.6 OUTROS USOS

O ano-base dos outros usos foi calibrado usando as seguintes equações: 14, 15 e 16:

$$CE_{\text{total outros usos}_t} = CE_{\text{principais aparelhos}_t} + CE_{\text{outros aparelhos}_t} \quad (14)$$

$$CE_{\text{principais aparelhos}_t} = \sum_{i,j,t} \text{residências}_{it} \cdot \text{posse média}_{i,j,t} \cdot \text{potência}_{i,j,t} \cdot \text{horas de uso}_{i,j,t} \quad (15)$$

Em que,

$CE_{\text{principais aparelhos}_t}$: representa o consumo de energia referente ao uso dos principais aparelhos dos outros usos no Brasil;

t: é o ano (2010, ..., 2050);

i: representa as regiões;

j: representa o tipo de aparelho (televisão, ferro, computador e máquina de lavar);

residências_i: é o número de residências por região;

posse média_{i,j}: é a posse média de aparelho por tipo e por região;

potência_{i,j}: é a potência por tipo aparelho e por região (W); e

horas de uso_{i,j}: são as horas de utilização do aparelho (h) por tipo e por região.

$$CE_{\text{outros aparelhos}_t} = \text{Elasticidade renda da demanda} \cdot \Delta \text{Consumo das famílias} \quad (16)$$

Embora na caracterização do consumo de energia do estudo do Procel/Eletrobras (2007a) tenha se reconhecido que apenas três aparelhos eram importantes no consumo de energia da categoria outros usos (televisão, ferro de passar e rádio), na continuação se faz uma desagregação mais detalhada considerando outros aparelhos a fim de reconhecer quais equipamentos têm ganhado importância no consumo de energia.

3.3.2.6.1 POSSE DE EQUIPAMENTOS

A Tabela 52 mostra os parâmetros de posse média de equipamentos para o ano 2010 levados em consideração para calibrar o ano-base.

Tabela 52 – Posse Média de Equipamentos por Domicílio Correspondentes a Outros Usos (2010)

Região	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Norte	Nordeste	Brasil
Televisão	1,46	1,63	1,24	1,16	1,30	1,41
Ferro elétrico	0,94	0,96	0,92	0,77	0,91	0,93
Som	0,73	0,90	0,60	0,47	0,75	0,74
Máquina de lavar	0,74	0,77	0,73	0,55	0,35	0,63
Computador	0,58	1,33	0,85	0,52	0,69	0,62
Celular	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
Forno micro-ondas	0,37	0,40	0,24	0,08	0,15	0,30
Outros Cozinha	1,76	1,80	2,20	1,64	1,18	1,57

Fonte: Elaboração própria com base em CHAGAS, 2015; IBGE, 2014b; EPE, 2010

Quando comparado com o ano 2005, a posse média de computadores e celulares tem ganhado importância. Segundo Teleco (2015), em setembro de 2014, existiam no Brasil 278,5 milhões de celulares, ou seja, 1,37 celulares para cada habitante.

Nesse sentido, no caso da posse média considerada para o ano-base, estimou-se que existem 3,21 celulares por domicílio, dado que corresponde ao número de habitantes por domicílio. No caso do computador, tomou-se como referência o estudo de Chagas (2015) e foi feita a atualização com base em dados da Pnad (2001-2012) correspondentes ao aumento da porcentagem de domicílios com microcomputador.

A Figura 65 apresenta o aumento percentual de posse de microcomputadores nos domicílios brasileiros. Observa-se que as regiões Nordeste e Norte têm a menor média de posse de microcomputadores. Chama a atenção também o fato de as regiões Sudeste e Sul terem posse média de microcomputador maior do que a do Brasil.

O microcomputador tem ganhado importância em detrimento, por exemplo, do aparelho de som, que tem sido substituído também por televisores mais modernos.

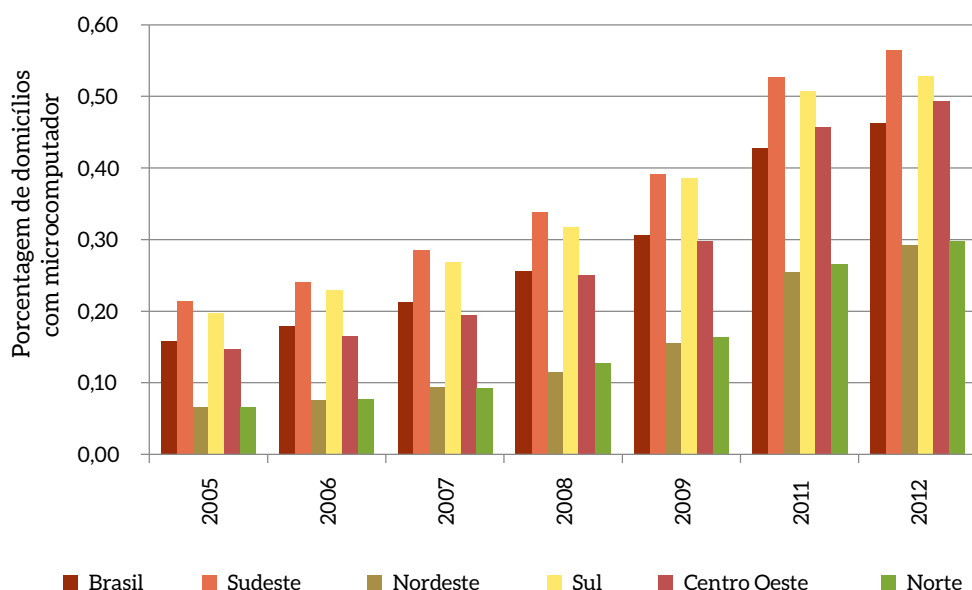


Figura 65 – Posse Média do Equipamento Microcomputador (2005-2012)

Fonte: Elaboração própria com base em dados de PNAD, 2005-2012

3.3.2.6.2 USO E EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

Com relação à potência e ao tempo de uso dos equipamentos considerados como outros usos, a Tabela 53 mostra a informação correspondente à potência nominal e ao uso de alguns eletrodomésticos.

Tabela 53 – Potências Nominais e Frequência de Uso dos Eletrodomésticos

Equipamentos	Potência nominal (W)	Dias estimados para uso	Média por dia (Horas)	Tempo de uso ano (Horas)
Televisão	90	30	5	1.800
Ferro elétrico	1.221	12	1	144
Som	80	4	2	96
Máquina de lavar	500	12	1	144
Computador	100	30	3	1.080
Celular	5	30	3	1.080
Micro-ondas	1.200	30	0,33	120
Outros Cozinha	475			68

Fonte: Elaboração própria a partir de CHAGAS, 2015

3.3.2.6.3 CONSUMO DE ENERGIA NO ANO-BASE

O consumo total de energia demandado em “outros usos” foi de 3.484 ktep em 2010, segundo a aproximação *top-down* feita.

Na Figura 66, é possível observar a participação de cada equipamento – categorizado como “outros usos” – neste total consumido. Nota-se que a televisão e o ferro elétrico continuam tendo a importância que tinham, segundo Procel/Eletronbras (2007a), no ano-base 2005. Contudo, o som já não tem a mesma importância, uma vez que outros aparelhos têm ganhado relevância no consumo, como é o caso do computador.

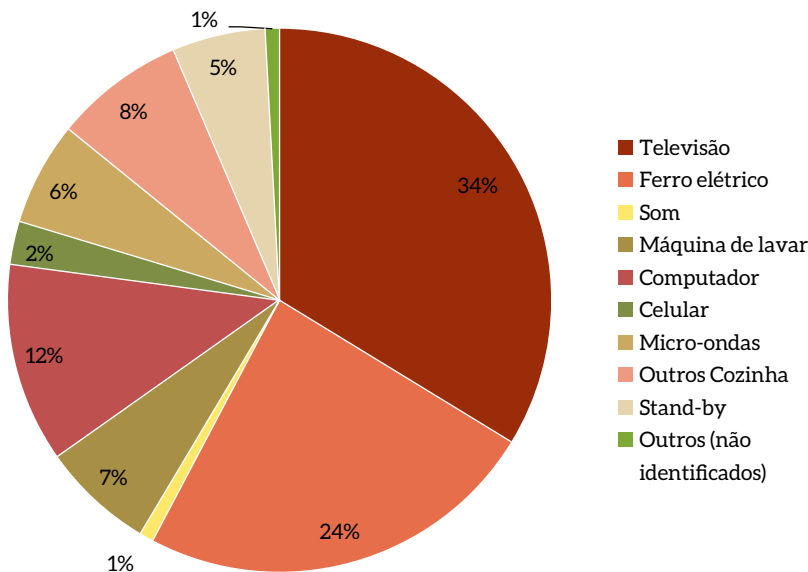


Figura 66 – Distribuição de Consumo de Energia no Brasil para Outros Usos (2010)

Fonte: Elaboração própria

3.4 SETOR COMERCIAL E SERVIÇOS

Estatísticas consistentes do uso de energia em edificações comerciais são pouco usuais. Mesmo nos EUA, a pesquisa da Energy Information Agency (EIA) no setor é realizada com periodicidade decenal. De acordo com a referida pesquisa de EIA (2013), puderam ser identificadas as parcelas do uso de energia por uso, para cada tipo de edificação nos EUA. Na Tabela 54, são indicados os valores relativos ao consumo de eletricidade.

Tabela 54 – Consumo de Eletricidade por Tipo de Edificação nos EUA (2003 em %)

Uso	Consumo de eletricidade por uso e tipo de edificação (%)							
	Educação	Alimentação	Saúde	Hospedagem	Comércio	Escritórios	Serviços	Total do setor
Aquecimento ambiental	4,0	2,9	2,7	6,0	7,9	4,6	2,8	4,7
Climatização	42,3	9,2	34,5	16,4	24,1	22,8	17,9	25,8
Aquecimento de água	3,0	0,0	0,9	5,2	5,2	1,0	0,0	2,5
Iluminação	30,5	22,3	47,7	53,4	42,0	39,1	60,6	37,6
Cocção	0,5	1,0	0,5	0,9	0,3	0,1	0,0	0,7
Equipamentos de escritório	9,7	1,9	5,5	2,6	2,6	14,8	1,8	6,3
Refrigeração	4,3	57,8	3,6	5,2	6,7	4,9	4,1	10,7
Outros	5,7	4,9	4,5	10,3	11,3	12,7	12,8	11,7

Fonte: Elaborado a partir de EIA, 2013

A EIA (2013) apresenta também valores para o consumo de gás natural nos EUA, tabulados a seguir (Tabela 55).

Tabela 55 – Consumo de Gás Natural por Tipo de Edificação nos EUA (2003 em %)

Uso	Consumo de gás natural por uso e tipo de edificação (%)							
	Educação	Alimentação	Saúde	Hospedagem	Comércio	Escritórios	Serviços	Total do setor
Aquecimento ambiental	77,2	26,9	56,0	31,7	71,2	85,5	86,2	67,6
Climatização	13,8	27,9	30,5	61,4	7,2	4,8	1,4	16,6
Aquecimento de água	1,9	45,3	4,1	6,9	9,1	1,1	0,0	7,8
Iluminação	7,1	0,0	9,5	0,0	12,5	8,6	12,3	8,0
Cocção	77,2	26,9	56,0	31,7	71,2	85,5	86,2	67,6
Equipamentos de escritório	13,8	27,9	30,5	61,4	7,2	4,8	1,4	16,6
Refrigeração	1,9	45,3	4,1	6,9	9,1	1,1	0,0	7,8
Outros	7,1	0,0	9,5	0,0	12,5	8,6	12,3	8,0

Fonte: Elaborado a partir de EIA, 2013

Tais dados para o Brasil são ainda mais limitados. Além dos valores do BEU, apresentados na seção 1.2.1, a Eletrobras (2007) apresenta a distribuição do consumo de eletricidade, por uso final, para edifícios comerciais atendidos em média tensão, como resultado de pesquisa realizada em 2005 (Figura 67).

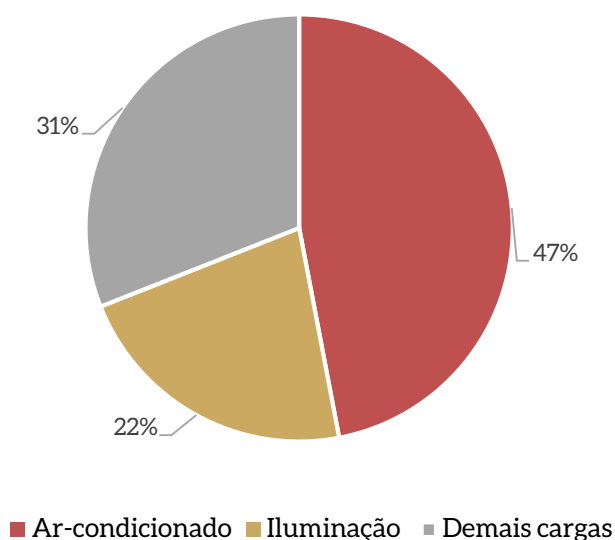


Figura 67 – Distribuição do Consumo por Uso Final em Edifícios Comerciais em Média Tensão

Fonte: Elaboração própria a partir de ELETROBRAS, 2007

A Figura 68 ilustra a distribuição do consumo por usos finais distintos para três tipos de edifícios comerciais.

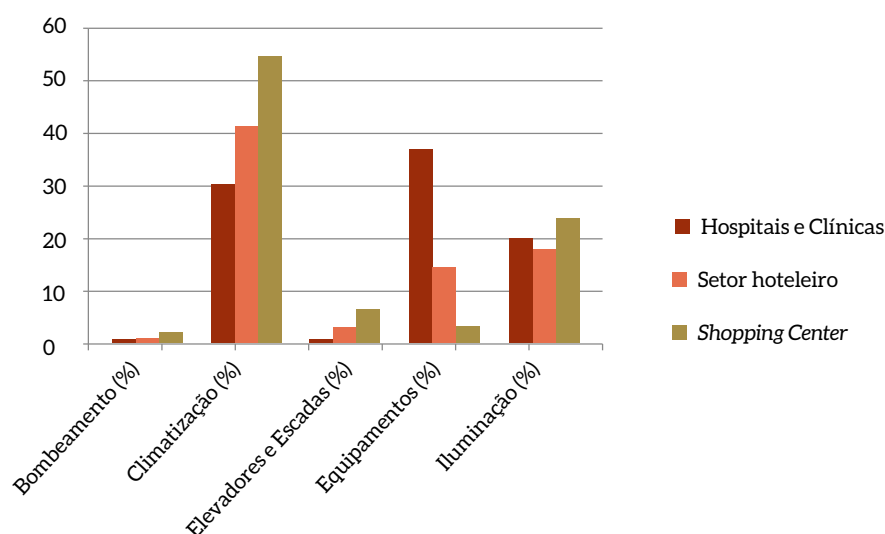


Figura 68 – Distribuição do Consumo de Energia Elétrica nos Setores de Hotéis, Shopping Centers e Hospitais

Fonte: Elaborado a partir de EIA, 2013

Considerando a disponibilidade limitada de dados para o Brasil, é proposta a adoção do seguinte critério para distribuição do consumo de energia no setor comercial:

- Eletricidade: adotar valores apresentados em EIA (2013), eliminando-se parcela relativa a aquecimento ambiental, agregando-se equipamentos de escritório e outros numa só categoria e recalculando-se parcela dos demais usos, por tipologia;
- Gás natural e GLP: de forma similar, adotar valores apresentados em EIA (2013), excluindo-se parcela associada a aquecimento ambiental;
- Demais fontes energéticas: considerar integralmente como destinadas a aquecimento de água.

Com isso, os valores propostos para alocação da eletricidade no setor comercial e serviços no Brasil são os apresentados na Tabela 56.

Tabela 56 – Destinação do Consumo de Eletricidade – Setor Comercial e Serviços (%)

Uso	Educação	Alimentação	Saúde	Hospedagem	Comércio	Escritórios
Climatização	44	10	36	17	26	24
Aquecimento de água	3	0	1	6	6	1
Iluminação	32	22	49	56	46	41
Cocção	1	1	0	1	0	0
Refrigeração	4	60	4	6	7	5
Outros	16	7	10	14	15	29
Total	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria a partir de EIA, 2013

De forma similar, para o consumo de combustíveis, a destinação seria a indicada na Tabela 57.

Tabela 57 – Destinação do Consumo de Combustíveis – Setor Comercial e Serviços (%)

Uso	Educação	Alimentação	Saúde	Hospedagem	Comércio	Escritórios
Aquecimento de água	61	38	69	90	25	33
Cocção	8	62	10	10	32	8
Outros	31	0	21	0	43	59
Total	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria a partir de EIA, 2013

As tabelas anteriores permitem distribuir o consumo de energia (eletricidade ou combustíveis) em função do tipo de edificação. Resta apurar a participação de cada um dos tipos considerados no consumo total do setor. Na ausência de dados físicos (consumo de energia), foram adotadas as despesas com energia elétrica, água e esgoto, apresentadas em pesquisas setoriais do IBGE (2010).

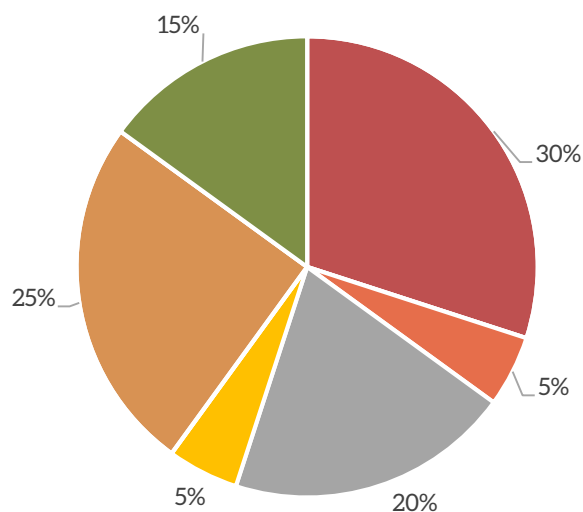
Foram adotados valores relativos a 2010 que constam na Pesquisa Anual do Comércio (IBGE, 2010) e na Pesquisa Anual de Serviços (IBGE, 2010). Consolidando os valores indicados, as despesas totais, que servirão para distribuição do consumo de eletricidade, são as seguintes (Tabela 58):

Tabela 58 – Custos com Eletricidade, Água e Esgoto (2010)

Item	Custo (mil R\$)	Participação (%)
Total – Comércio e Serviços	16.460.564	100,0
Total – Serviços	6.162.936	37,4
Serviços de alojamento	689.335	4,2
Serviços de alimentação	813.328	4,9
Atividades de ensino continuado	39.966	0,2
Total – Comércio	10.297.628	62,6
Hipermercados e supermercados	2.528.153	15,4

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2010

Pode ser observada a relevância do grupo “hipermercados e supermercados” nos custos anteriores. Por esse motivo, é acrescentada essa categoria – que não é explícita em EIA (2013), com distribuição do consumo de eletricidade segundo valores descritos em Panesi (2008), mostrados na Figura 69.



■ Climatização ■ Aquecimento de água ■ Iluminação ■ Cocção ■ Refrigeração ■ Outros

Figura 69 – Destinação do Consumo de Eletricidade de Supermercados e Hipermercados

Fonte: Elaboração própria a partir de PANESI, 2008

Como não se apresentam nas pesquisas do IBGE os gastos com eletricidade correspondentes a estabelecimentos de saúde, utilizou-se o consumo do pessoal ocupado, apresentado no Cadastro de Empresas (IBGE, 2014b), como critério para estimar o consumo elétrico. Segundo IBGE (2014b), o grupo “Educação” ocupava, em 2010, um total de 2,737 milhões de pessoas, enquanto o grupo “Saúde humana e serviços sociais”, um total de 2,065 milhões. Portanto, o consumo de energia para estabelecimentos de saúde é calculado como proporcional ao pessoal ocupado do grupo “Educação”.

Quanto ao consumo de combustíveis por tipo de edificação, não foram localizadas referências brasileiras que permitissem ao menos inferir a distribuição do consumo. Por esse motivo, usaram-se dados de EIA (2013) para distribuição do consumo total do setor, resultando nos valores indicados na Figura 70.

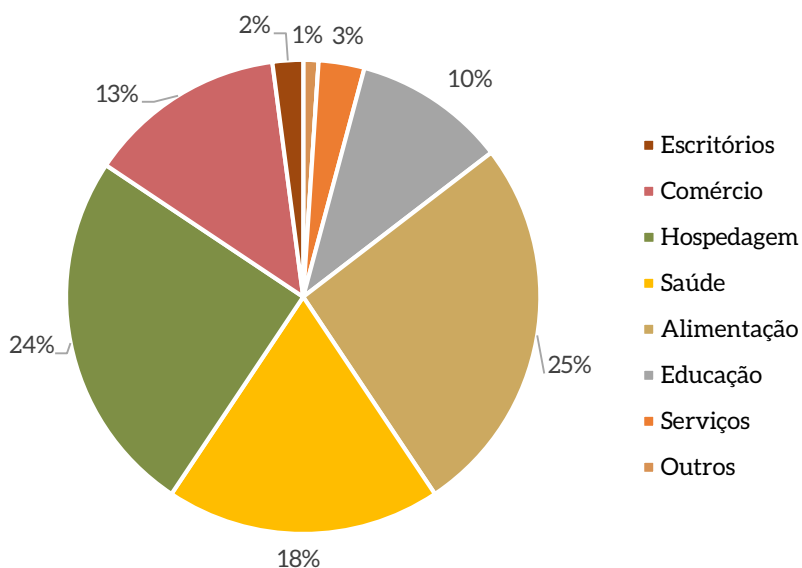


Figura 70 – Distribuição do Consumo de Combustíveis por Tipo de Estabelecimento

Fonte: Elaboração própria a partir de EIA, 2013

Combinados todos os critérios apresentados e aplicando-os sobre os números totais do setor, é possível obter os consumos por uso final, segundo a tipologia de edificação (Tabela 59). Observa-se que a aplicação da metodologia permitiu aproximar significativamente o consumo de energia constante do BEN (Tabela 2).

Tabela 59 – Consumo por Uso Final e Tipo de Edificação do Setor Comercial e Serviços (2010 em ktep)

Fonte/Uso final	Escolas	Restaurantes	Hospitais	Hotéis	Supermercados	Outros	Total
Total Eletricidade	14,6	296,3	11,0	251,1	920,9	4.502,0	5.995,7
Climatização	6,4	28,1	3,9	43,8	276,3	828,2	1.186,7
Aquecimento de água	0,4	0,0	0,1	13,8	46,0	0,0	60,4
Iluminação	4,6	68,1	5,4	142,8	184,2	2803,1	3.208,2
Cocção	0,1	3,0	0,1	2,3	46,0	0,0	51,4
Refrigeração	0,7	176,3	0,4	13,8	230,2	191,1	612,5
Outros	2,3	20,7	1,1	34,6	138,1	679,5	876,4
Total Combustíveis	65,9	158,9	115,7	149,2	42,2	203,2	735,0
Aquecimento de água	40,0	60,5	80,0	134,0	10,5	21,4	346,5
Cocção	5,4	98,4	10,8	15,1	13,3	0,0	143,0
Climatização	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outros	20,5	0,0	24,9	0,0	18,3	181,8	245,5
Total	80,5	455,1	126,6	400,2	963,0	4.705,2	6.730,7

Fonte: Elaboração própria

Embora a categoria “Outros” seja a mais representativa, optou-se por indicar o consumo em diferentes tipos de edificações, pois as ações para mitigação são diversas para cada uma delas.

3.5 SETOR PÚBLICO

Não é considerada uma desagregação das edificações do setor público, pois não foram localizadas bases que permitissem melhor detalhamento do setor. Assim, as análises e modelagem relativas a essas edificações serão realizadas de forma agregada, não havendo propriamente uma modelagem *bottom-up*.

Embora a iluminação pública não faça parte do consumo energético das edificações, tendo em vista sua consideração pelo BEN e principalmente as oportunidades de mitigação de emissões associadas à eficiência energética, será avaliada no âmbito dos cenários.

3.5.1 ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Para maior desagregação do setor de iluminação pública, é inicialmente considerado o parque existente no país. A referência mais próxima ao ano-base é o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEE), que indica a seguinte quantidade de equipamentos instalados (Tabela 60).

Tabela 60 – Parque de Iluminação Pública (2008)

Tecnologia	Quantidade	Participação
Vapor de sódio	9.294.611	62,9%
Vapor de mercúrio	4.703.012	31,8%
Mistas	328.427	2,2%
Incandescentes	210.417	1,4%
Fluorescentes	119.535	0,8%
Multivapor metálico	108.173	0,7%
Outras	5.134	0,0%
Total	14.769.309	100,0%

Fonte: Elaborado a partir de EPE, 2015b

O consumo de energia de equipamentos de iluminação pública depende de diferentes fatores, especialmente a potência do conjunto lâmpada e reator e o número de horas de funcionamento – valores não disponíveis na literatura. Assim, foram adotadas as seguintes premissas:

- O tempo de funcionamento dos equipamentos é o mesmo para qualquer tecnologia ou local de instalação;
- Potências médias de cada tecnologia, conforme indicação em Dambiski (2007).

Combinadas essas premissas com o consumo anual apresentado no Anuário de Energia Elétrica (EPE, 2015b), é possível distribuir o consumo de eletricidade por cada tipo de tecnologia indicada, de acordo com a Tabela 61. Observa-se um razoável ajuste com os valores do BEN, motivo pelo qual é assumida a mesma participação por tipo de tecnologia para obtenção do consumo elétrico em 2010. Para as demais fontes, assumiu-se participação idêntica ao BEN.

Tabela 61 – Consumo de Energia por Tipo de Tecnologia Utilizada na Iluminação Pública

Tecnologia	Watt médio	Potência instalada (MW)	Consumo (ktep)
Vapor de sódio	250	2.323,7	661
Vapor de mercúrio	250	1.175,8	334
Mistas	250	82,1	23
Incandescentes	150	31,6	9
Fluorescentes	110	13,1	4
Multivapor metálico	150	16,2	5
Outras	90	0,5	0
Total	-	3.642,9	1.036

Fonte: Elaboração própria

3.6 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A aplicação de unidades de geração de energia elétrica conectadas à rede de distribuição é ainda bastante incipiente no Brasil. Embora o uso de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica em sistemas isolados tenha mais de 15 anos, o uso da tecnologia conectada à rede tem apenas dois anos de histórico. O mesmo ocorre com a tecnologia eólica de pequeno porte, até o momento, com aplicações apenas em pequenos povoados ou ilhas.

Isso ocorre porque, embora a primeira regulamentação para geração distribuída date do início da década de 2000, até então, esses sistemas eram apenas utilizados por autoprodutores de energia normalmente provenientes do setor industrial. Apenas no início de 2012 a modalidade passou a ser permitida para todos os consumidores, com a publicação do Marco Regulatório nº 482 da Aneel (ANEEL, 2012), que estabelece o sistema de compensação de energia para geração distribuída, isto é, de que forma a transação de energia com o *grid* será feita. Desde então, aproximadamente, 41 kW e 3,7 MWp foram instalados no âmbito da norma em empreendimentos de energia eólica e fotovoltaica, respectivamente. A medida promete dar impulso ao setor, sobretudo aos consumidores conectados à rede de baixa tensão do sistema.

Dito isso, em 2010, ano-base do presente estudo, não há capacidade instalada fotovoltaica e eólica. Todavia, será observada entrada de geração distribuída no cenário REF, a qual será apresentada no próximo capítulo.



Cenário de referência

Capítulo

4

4 CENÁRIO DE REFERÊNCIA

Este capítulo apresenta a evolução do consumo de energia e emissões segundo o cenário REF, projetadas até 2050. Para tanto, são aplicados os procedimentos metodológicos constantes do capítulo 3 deste relatório.

O cenário REF é visto como uma linha de base, pois não considera nenhuma modificação estrutural significativa. Ele aponta o que aconteceria caso não fosse tomada nenhuma medida de mitigação de emissões de GEE adicional nos setores analisados e na GD. Dessa forma, as variáveis seguem a trajetória de tendência atual até 2050.

O procedimento explicitado neste capítulo consiste na identificação de premissas básicas sobre os *drivers* do consumo energético, como crescimento populacional, assim como pressupostos acerca da evolução da posse, do uso e da eficiência de equipamentos de uso final. A partir dessas informações e com base nas equações descritas na seção 3.3, são projetados o consumo de energia e as emissões resultantes no horizonte de tempo analisado.

A abordagem descrita acima é aplicada aos setores residencial, comercial e serviços, e público. A GD segue uma abordagem diferente, conforme será exposto na seção 4.5.

4.1 PREMISSAS GERAIS

4.1.1 POPULAÇÃO E DEMOGRAFIA

Conforme já mencionado, as três variáveis demográficas básicas utilizadas no modelo de edificações são população, número de domicílios e habitantes por domicílio.

Os dados populacionais tiveram como referência IBGE (2013), que projeta a população por unidade da Federação até o ano 2030 e a população total brasileira (sem segmentação por estado ou região) até o ano 2050. Dadas as necessidades de algumas das projeções realizadas, foi necessário desagregar por região do país a população total dada pelo IBGE, referente ao período 2031-2050. Para tal, considerou-se que cada região (Sudeste, Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste) manteria a mesma participação no total da população brasileira durante esse período. As participações mantidas constantes de 2031 a 2050 podem ser observadas na Figura 71, enquanto a população brasileira total dividida por região, de 2010 a 2050, está na Figura 72.

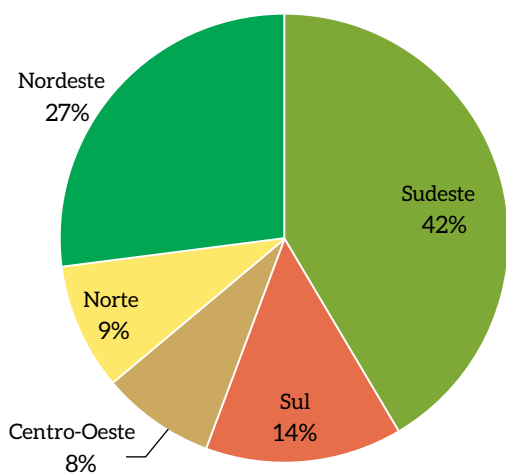


Figura 71 – Participação de Cada Região na População Brasileira (2030)

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2013

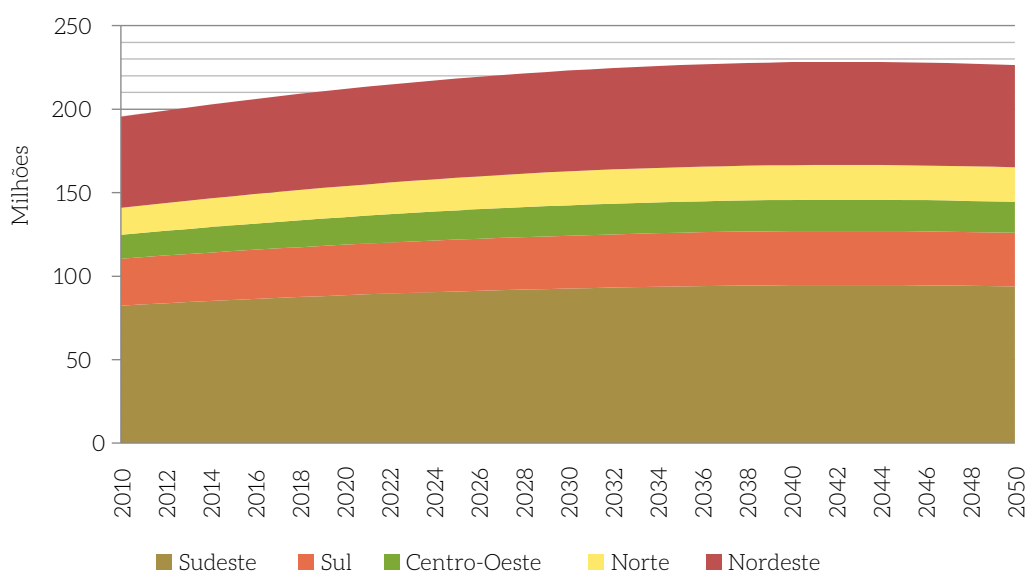


Figura 72 – Projeção da População Brasileira por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE, 2013

Segundo as projeções do IBGE (2013), a população brasileira atinge seu auge no ano 2042, com pouco mais de 228 milhões de habitantes. Em 2050, a população cai para aproximadamente 226 milhões.

Como o IBGE não realiza estimativa da evolução futura de domicílios brasileiros, utilizou-se o estudo de demanda para o PNE 2050 (EPE, 2014a) como base. Contudo, tal estudo não segmenta os domicílios por região do país (informa somente o total nacional de domicílios) e fornece apenas dados referentes aos anos 2013, 2020, 2030, 2040 e 2050. Para contornar essas indisponibilidades de dados, foi utilizada uma interpolação linear nos demais anos em que os dados não eram apresentados e assumiu-se que a distribuição de novos domicílios por região acompanharia o crescimento demográfico. Tomando como exemplo o número de domicílios no Nordeste, em 2014, a metodologia pode ser resumida na Equação 17.

$$\text{Residências NE}_{2014} = \text{Res. NE}_{2013} + \left(\Delta \text{Res. Brasil}_{2013/2014} \cdot \left(\Delta \text{Pop. NE}_{2013/2014} / \Delta \text{Pop. Brasil}_{2013/2014} \right) \right) \quad (17)$$

Sendo que,

$\text{Residências NE}_{2014}$: é o número de domicílios no Nordeste, em 2014;

Res. NE_{2013} : é o total de residências no Nordeste em 2013;

$\Delta \text{Res. Brasil}_{2013/2014}$: é a variação de residências no Brasil de 2013 a 2014;

$\Delta \text{Pop. NE}_{2013/2014}$: é a variação populacional do Nordeste de 2013 a 2014; e

$\Delta \text{Pop. Brasil}_{2013/2014}$: é a variação populacional do Brasil de 2013 a 2014.

A aplicação da metodologia descrita resultou no perfil de residências por região disposto na Figura 73.

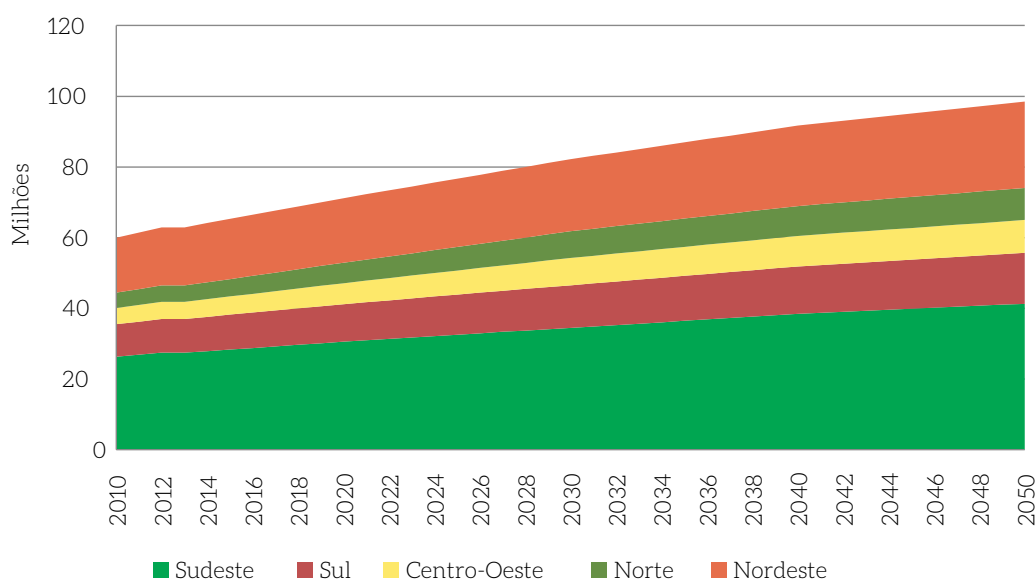


Figura 73 – Projeção da Quantidade de Domicílios por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE, 2013; EPE, 2014a

Por fim, com base nas duas informações levantadas anteriormente, pode-se calcular o número de habitantes por domicílio em cada região do país, informação que está ilustrada na Figura 74.

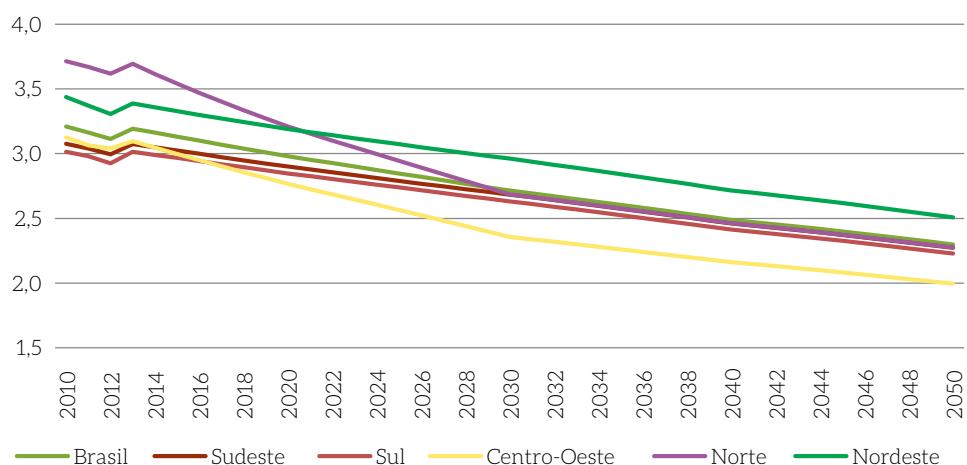


Figura 74 – Projeção da Quantidade de Habitantes por Domicílio por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE, 2013; EPE, 2014a

Nota-se, portanto, que a população brasileira passa por uma transformação significativa ao longo do período analisado, chegando a uma média nacional de 2,3 habitantes por domicílio em 2050. A região que alcança o menor valor para esse indicador, em 2050, é o Centro-Oeste, com aproximadamente duas pessoas por domicílio. E o maior valor pertence ao Nordeste, com cerca de 2,5 habitantes por domicílio.

4.1.2 ECONOMIA

Projeções sobre o comportamento da economia brasileira em um horizonte tão vasto – até 2050 – são bastante limitadas, cabendo destacar as apresentadas pela EPE em seus estudos subsidiários ao PNE 2050.

Neste relatório, para composição do cenário REF, foram consideradas projeções elaboradas para o projeto por Haddad (2015), no âmbito da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas da Universidade de São Paulo (Fipe/USP).

De acordo com Haddad (2015), entre 2010 e 2050, o PIB total terá crescimento de aproximadamente 148%, com projeções individualizadas para os diversos segmentos econômicos. Especialmente de interesse para este relatório, são projetados valores adicionados apresentados na Tabela 62.

Tabela 62 – Valor Adicionado em Segmentos Econômicos Seleccionados (2010-2050 em milhões R\$)

Segmento	2010	2020	2030	2040	2050
Comércio	578.053	711.774	880.591	1.043.038	1.196.050
Serviços de alojamento e alimentação	86.384	110.473	151.429	195.618	235.775
Educação mercantil	52.502	86.809	144.593	231.354	354.666
Saúde mercantil	89.910	133.005	196.844	279.274	380.644
Administração pública e seguridade social	466.407	637.712	870.725	1.139.093	1.426.886

Fonte: HADDAD, 2015

No âmbito da modelagem integrada dos cenários de emissões de GEE do projeto, que integram todos os setores da economia brasileira, é considerada uma análise de sensibilidade dos resultados às projeções do PIB. Nesse caso, foram projetados novos cenários de crescimento do PIB que apresentam projeções mais conservadoras dessa variável do que as consideradas nessa análise setorial. Logo, é provável que os resultados que serão expostos posteriormente apresentem patamares superiores de emissões de GEE se comparados aos considerados na análise integrada dos cenários setoriais, que terão seus resultados reportados no âmbito dos documentos do Componente 2 do projeto.

4.2 SETOR RESIDENCIAL

4.2.1 ILUMINAÇÃO

4.2.1.1 PREMISSAS

A construção do cenário REF para o consumo de energia por iluminação teve como base a Equação 1 demonstrada na seção 3.3.2.1. Na elaboração desse cenário, fora o crescimento do número de residências, foi alterado o parâmetro de posse média de lâmpadas até o ano 2050. Ademais, os parâmetros de potência e tempo de uso foram mantidos.

Assumiu-se no cenário que a média de lâmpadas no Brasil (considerando todas as tecnologias) calculada para o ano-base foi de 8,58 lâmpadas/domicílio, assim como a posse média de lâmpadas para o ano 2050 será de 12,13 lâmpadas/domicílio, segundo EPE (2014a). Nesse sentido, estimou-se uma taxa de crescimento da posse média de lâmpadas de 0,87% a.a., que foi utilizada para calcular os valores desse parâmetro até o ano 2050.

Cabe mencionar que a modelagem incluiu o banimento das lâmpadas incandescentes a partir de 2016. Segundo a Portaria Interministerial MME, MCTI e MDIC nº 1.007/2010 (MME, 2010), os níveis mínimos de eficiência energética para a comercialização de lâmpadas incandescentes em 2016 deveriam estar entre 15 lm/W e 19 lm/W. Contudo, segundo o Inmetro (2014), os modelos de lâmpadas incandescentes comercializados e registrados têm uma eficiência que se encontra na faixa de 7,90 lm/W e 12,90 lm/W, que é menor que o limite inferior imposto pela referida portaria interministerial. Isso significaria que nenhum dos modelos de lâmpadas incandescentes comercializados atingiria o nível mínimo de eficiência para continuar no mercado. Assim, considerando que a vida útil de uma lâmpada é curta, aproximadamente 750 horas, a modelagem considera substituição total, em 2016, das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas.

A Tabela 63 mostra a evolução da posse média de lâmpadas por região considerada na modelagem. A região com menor posse de lâmpadas é a Sudeste, enquanto aquela com maior posse é a Norte. Porém, o consumo de energia total para esse uso é maior no Sudeste e menor no Norte como consequência da parcela de população que vive nessas regiões.³⁷

37 Para o ano 2010, 44% da população brasileira moravam na região Sudeste, enquanto apenas 7% moravam na região Norte.

Tabela 63 – Evolução Posse Média de Lâmpadas por Tecnologia e Região (2010/2050)

Região	Tipo de Tecnologia					
	Fluorescentes tubulares		Fluorescentes compactas		Incandescentes	
	2010	2050	2010	2050	2010	2050
Sudeste	1,27	1,80	2,93	10,36	4,40	0,00
Sul	2,42	3,42	4,33	9,34	2,28	0,00
Centro-Oeste	1,40	1,98	3,82	10,35	3,50	0,00
Norte	3,69	5,22	2,67	5,97	1,55	0,00
Nordeste	1,66	2,34	4,46	9,87	2,52	0,00

Fonte: Elaboração própria

A projeção de lâmpadas de cada tecnologia considerada para o cenário REF é ilustrada na Figura 75. Pode-se observar que, nesse cenário, é considerada a extinção das lâmpadas incandescentes e sua substituição por fluorescentes compactas.

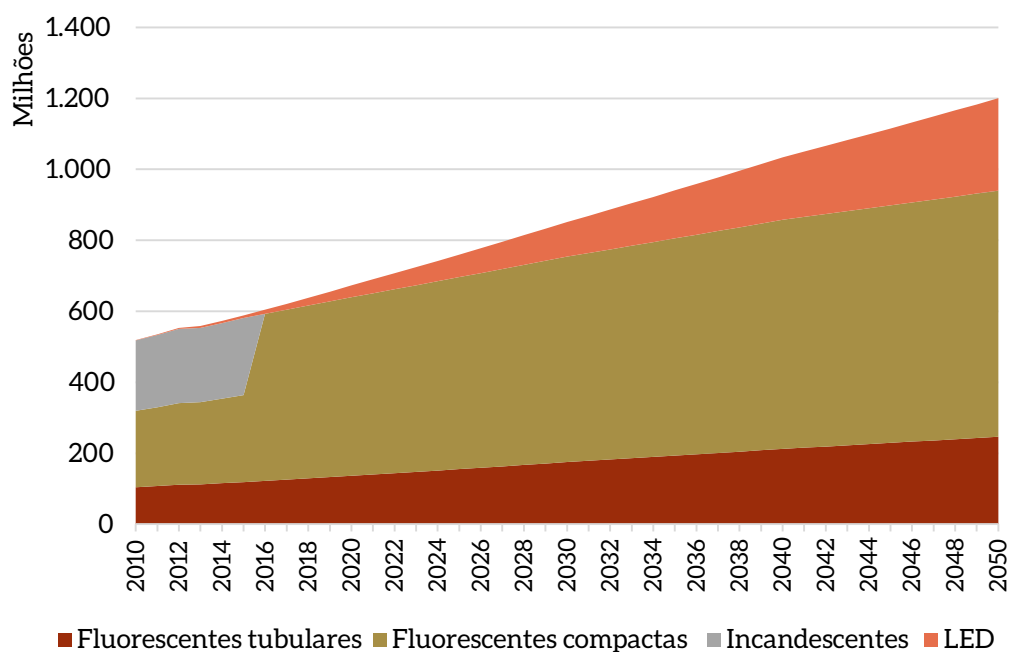


Figura 75 – Projeção de Lâmpadas no Cenário REF por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 76 mostra as projeções de vendas de lâmpadas por tipo de tecnologia para o cenário REF. Destaca-se o banimento das vendas de lâmpadas incandescentes a partir de 2016, considerando instruções da Portaria Interministerial MME, MCTI e MDIC nº 1.007/2010 (MME, 2010). Os picos de vendas de lâmpadas fluorescentes compactas a cada quatro anos se devem à reposição por término da vida útil originada no pico de vendas delas em 2016, tendo em vista a substituição total de lâmpadas incandescentes a partir desse ano.

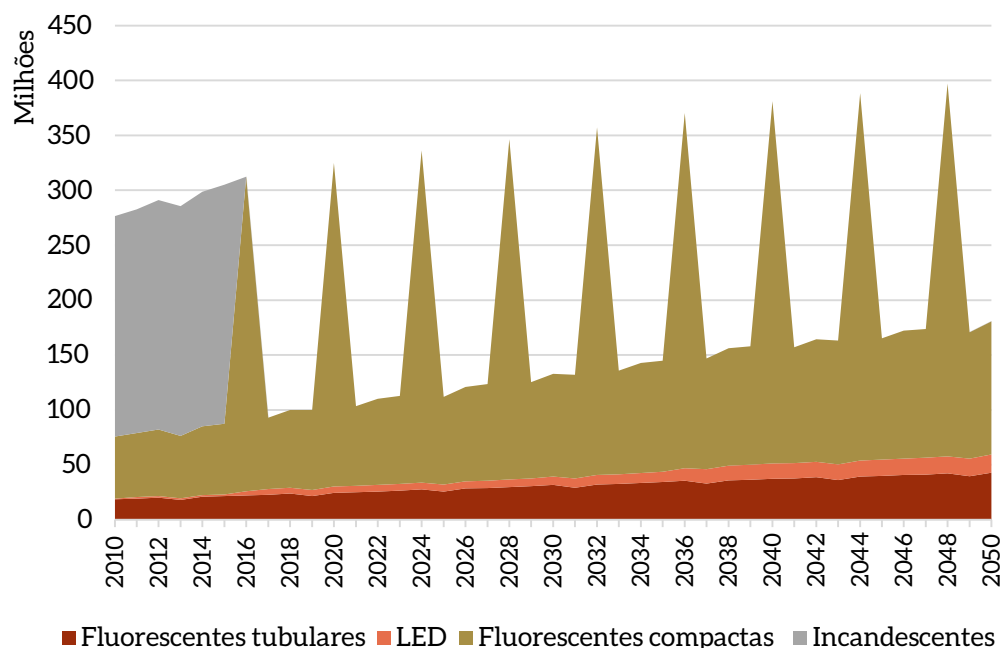


Figura 76 – Vendas de Lâmpadas no Cenário REF por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.1.2 RESULTADOS

Como resultado das premissas adotadas, observa-se que o consumo de energia por iluminação para o ano 2010 no Brasil foi de 1.470 ktep (17 TWh). A região Sudeste apresentou a maior participação no consumo total (51%) com consumo de 752 ktep (8,7 TWh) (Figura 77). Segundo a análise realizada, em 2050, o consumo de energia por iluminação no Brasil atingirá 1.683 ktep (19,5 TWh), crescimento atenuado em decorrência do banimento de lâmpadas incandescentes em 2016.

Um fato importante encontrado em todas as regiões, à exceção da região Sudeste, é que a parcela que representa a região no consumo de energia para iluminação passa a ser maior em relação ao ano-base 2010. Por exemplo, no caso da região Norte, em 2010, o consumo de energia para iluminação representou 5% do total, enquanto no ano 2050 passaria para 8%.

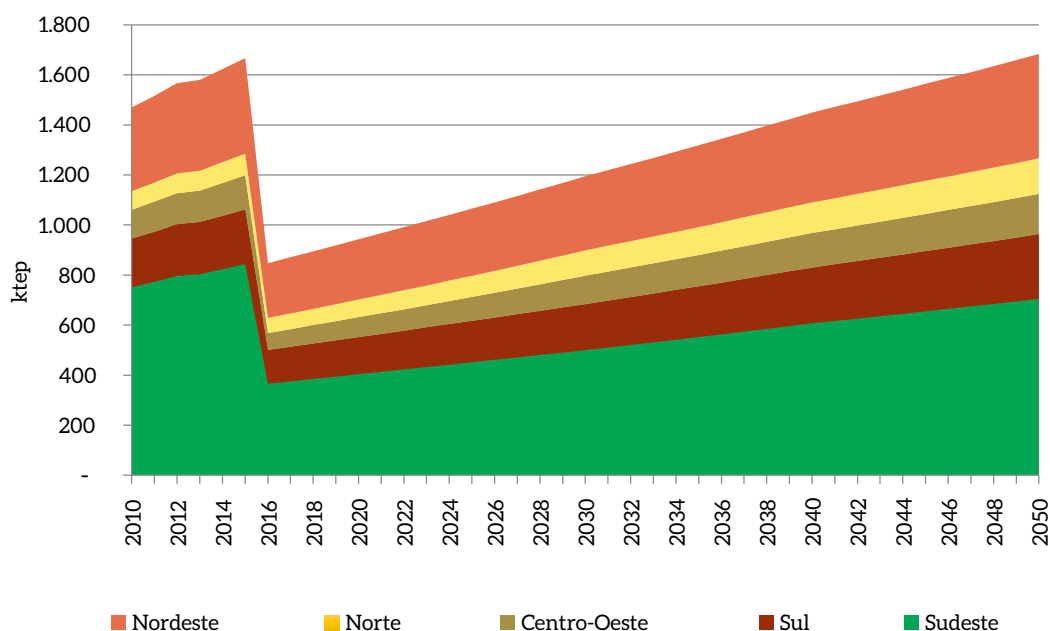


Figura 77 – Consumo de Energia do Uso Iluminação no Cenário REF por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Por fim, visando reconhecer que a queda no consumo de energia para iluminação apresenta-se como resultado do banimento das lâmpadas incandescentes, mostra-se a Figura 78. Segundo a premissa de substituição de lâmpadas incandescentes por compactas fluorescentes em 2016, o consumo de energia oriundo da tecnologia lâmpada fluorescente compacta representará uma parcela maior quando comparado com as fluorescentes tubulares.

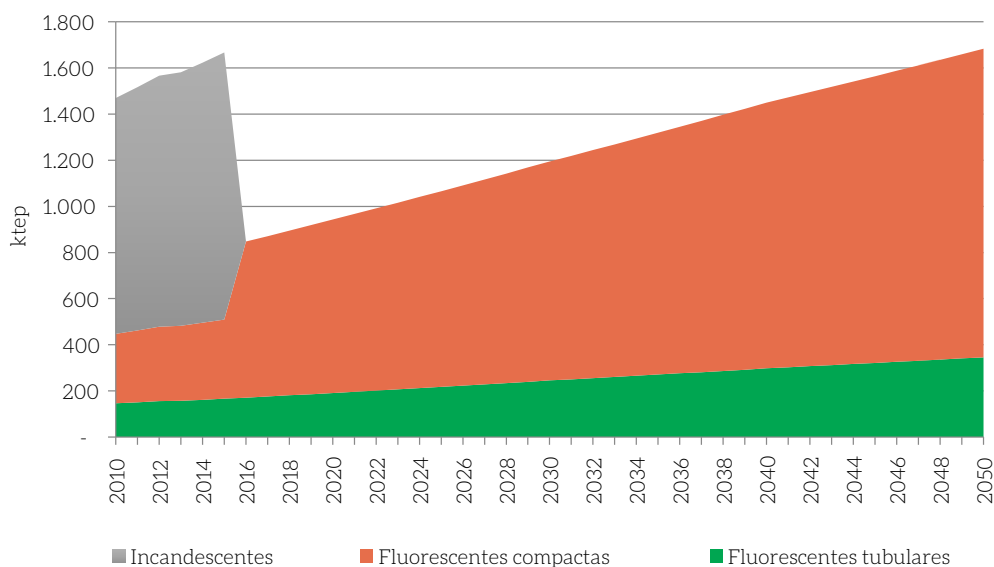


Figura 78 – Consumo de Energia do Uso Iluminação no Cenário REF por Tipo de Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.2 CLIMATIZAÇÃO

O cenário REF para climatização foi construído considerando a mesma metodologia para a construção do ano-base, conforme a Equação 4.

4.2.2.1 AR-CONDICIONADO

4.2.2.1.1 PREMISSAS

A projeção do consumo de energia dos equipamentos de ar-condicionado no cenário REF utilizou as seguintes premissas:

- Incremento das vendas totais com taxas decrescentes no tempo;
- Distribuição das vendas por região similar à de 2013, reportada pela Abrava (2014a), com a parcela das vendas nas regiões Nordeste e Sudeste aumentando no tempo e reduzindo nas regiões Centro-Oeste, Norte e Sul, para garantir que a posse não supere o valor de 100%;
- No futuro, mesma proporção das participações das vendas do ar-condicionado janela e *split* reportada em 2013 pela Abrava (2014b);
- COP dos equipamentos de ar-condicionado instalados no Brasil, no ano 2050, equivalente ao do melhor rendimento dos aparelhos disponíveis atualmente nas tabelas do Inmetro (2014).

Na Figura 79 e na Figura 80, são mostradas as projeções de vendas estimadas no Brasil por tipo de ar-condicionado e a evolução do COP assumida para o cenário REF, respectivamente.

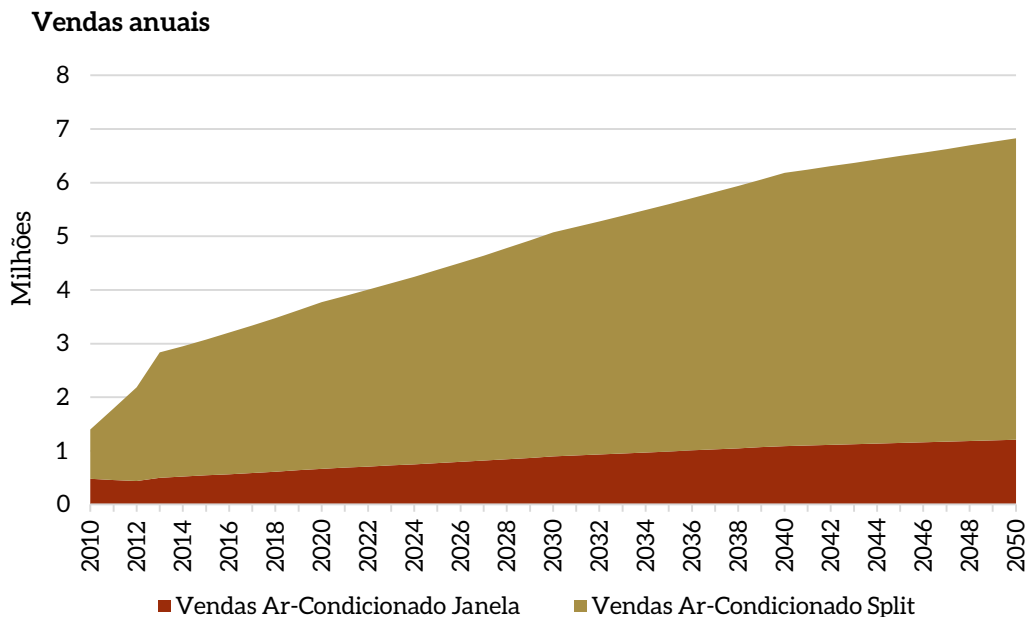


Figura 79 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado no Cenário REF por Tecnologia (2001-2049)

Fonte: Elaboração própria



Figura 80 – COP Representativo dos Equipamentos de Ar-condicionado por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Utilizando a Equação 6, obtiveram-se os equipamentos de ar-condicionado instalados a cada ano no horizonte temporal (Figura 81), assim como a posse desses equipamentos por regiões (Figura 82).

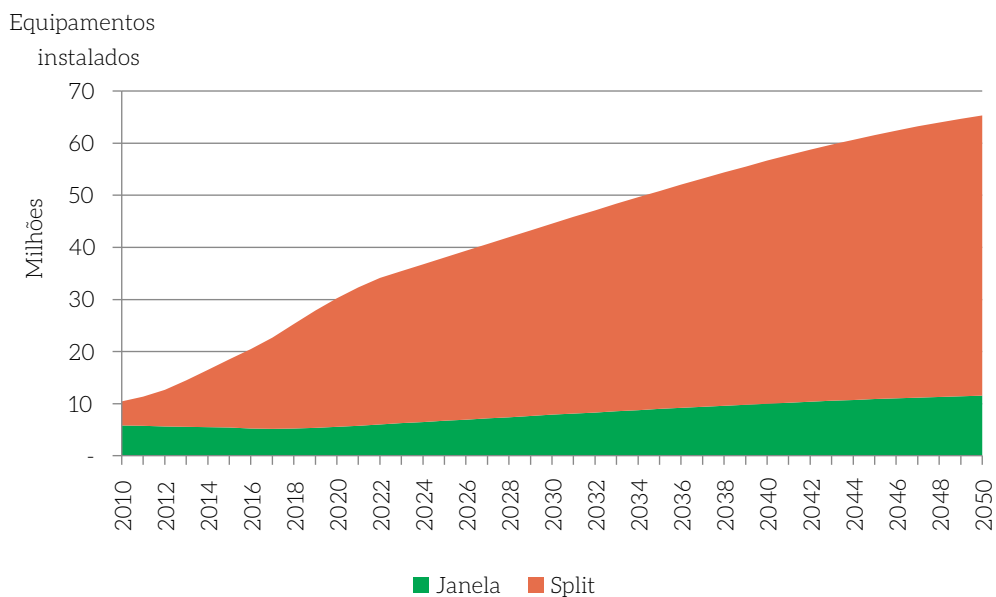


Figura 81 – Projeção de Equipamentos de Ar-condicionado Instalados no Cenário REF por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

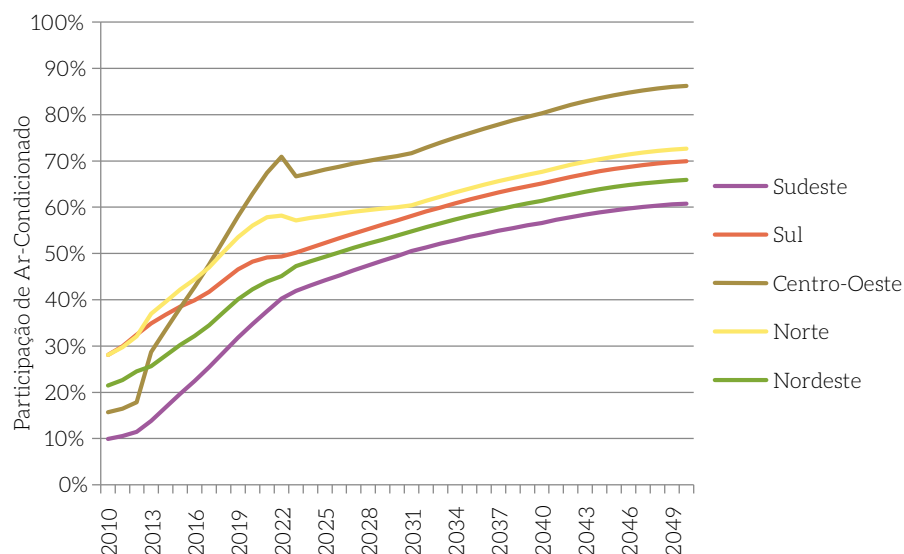


Figura 82 – Projeção de Posse de Ar-condicionado no Cenário REF por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.2.1.2 RESULTADOS

A partir dessas premissas, foi projetado o consumo de energia dos equipamentos de ar-condicionado no setor residencial por regiões (Figura 83).

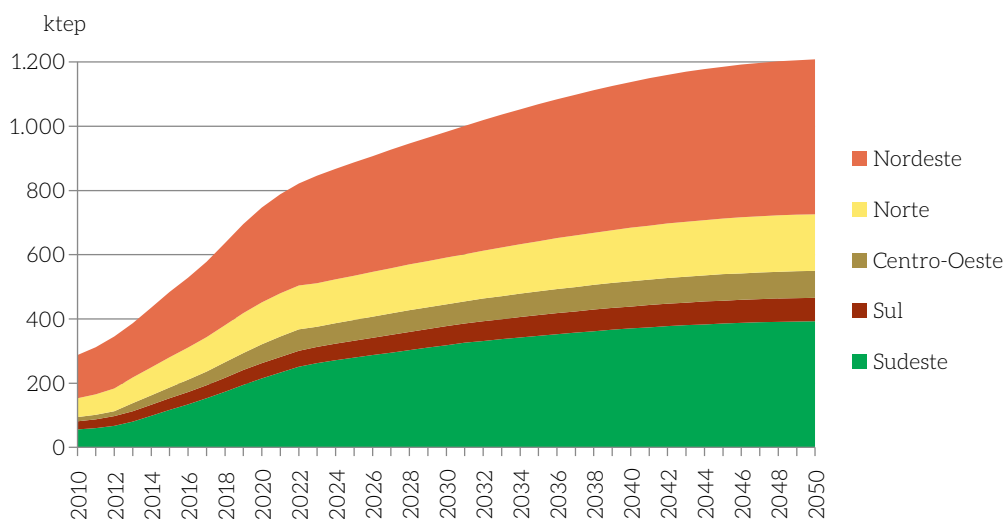


Figura 83 – Consumo de Energia dos Equipamentos de Ar-condicionado no Cenário REF por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.2.2 VENTILADOR

4.2.2.2.1 PREMISSAS

No caso dos ventiladores, foram utilizadas as seguintes hipóteses na construção do cenário REF:

- Incremento no nível de posse de ventiladores de teto nas regiões, em 2050, igual à posse da região Sul no ano-base (0,79 ventiladores por pessoa);
- Incremento no nível de posse de ventiladores portáteis nas regiões, em 2050, igual à posse da região Sul no ano-base (1,1), com exceção da região Norte, que mantém a mesma posse do ano-base (1,45);
- Redução de 5% na potência média dos ventiladores, em 2050, em relação ao ano-base.³⁸

4.2.2.2.2 RESULTADOS

As projeções de consumo de energia dos equipamentos de ventiladores no setor residencial por regiões são mostradas na Figura 84.

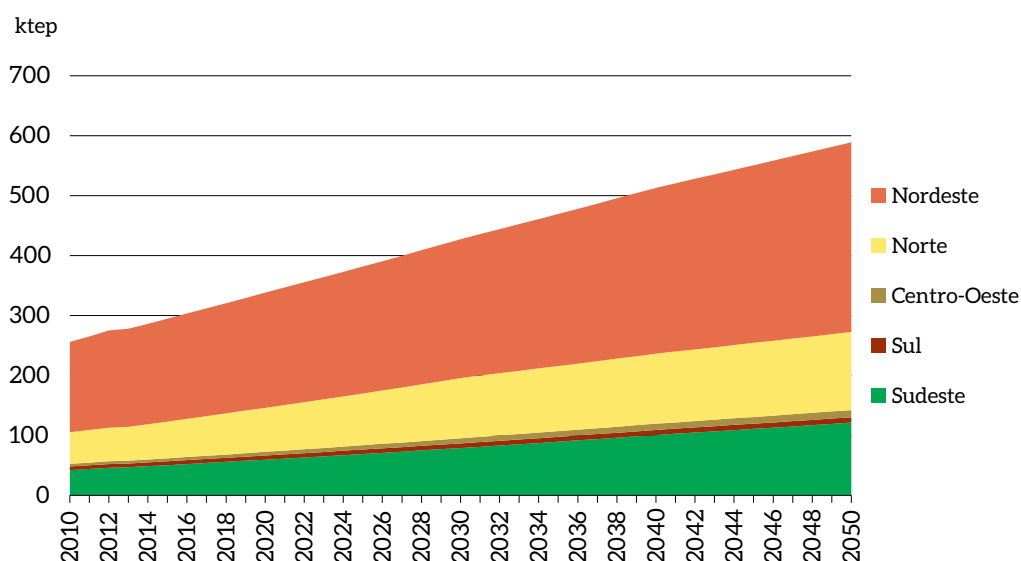


Figura 84 – Consumo de Energia dos Ventiladores no Cenário REF por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.2.3 RESULTADOS AGREGADOS PARA CLIMATIZAÇÃO

A Figura 85 mostra o consumo de energia do serviço de climatização como resultado da soma do consumo de equipamentos de ar-condicionado e ventiladores no setor residencial brasileiro.

³⁸ Isso reflete que, para uma mesma vazão de ar fornecida pelos ventiladores, vai-se precisar de um consumo de energia elétrica 5% menor.

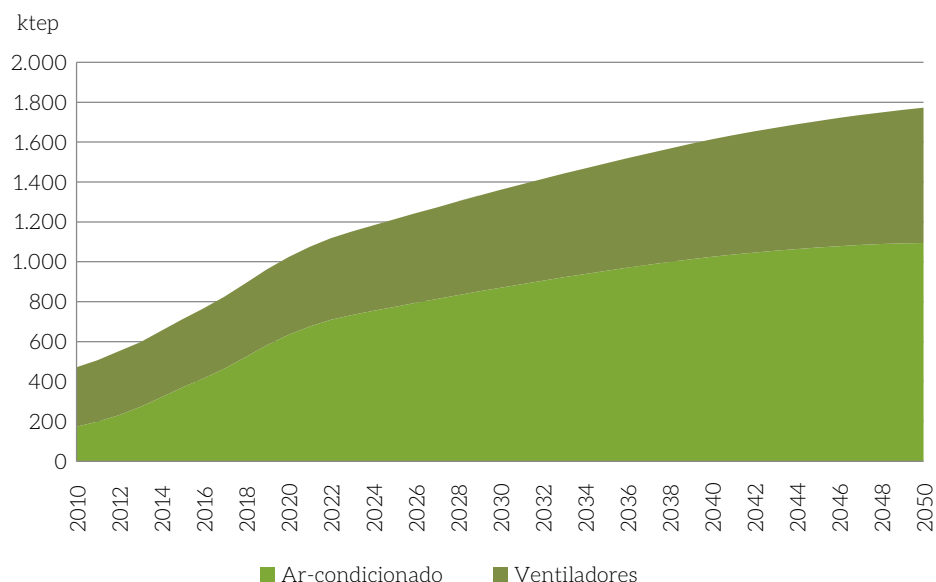


Figura 85 – Consumo de Energia do Uso Climatização no Cenário REF por Equipamento (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.3 REFRIGERAÇÃO

O cenário REF para o uso refrigeração foi construído considerando a mesma metodologia utilizada na elaboração do ano-base, conforme a Equação 10.

4.2.3.1 GELADEIRA

4.2.3.1.1 PREMISSAS

Para o cálculo do consumo de energia das geladeiras no cenário REF, utilizaram-se as seguintes premissas:

- Incremento no nível de posse de geladeiras nas regiões até atingir a posse do ano-base da região Sul (98%) em 2050. Isso influencia, sobretudo, o crescimento de posse das geladeiras nas regiões Norte e Nordeste;
- O tamanho médio das geladeiras no Brasil, em 2050, seria de 440 L, similar ao tamanho médio das geladeiras no Canadá, em 2010 (IEA 4E, 2013), o que representa participação de 24% da geladeira média de 250 L e de 76% da geladeira média de 500 L;
- Eficiência média das geladeiras existentes no Brasil, em 2050, seria igual à de melhor rendimento entre as geladeiras atuais das tabelas do Inmetro (2014), que é de 1,08 kWh/L-ano.

A Figura 86 mostra as vendas de geladeiras no Brasil projetadas para o cenário REF e a Figura 87 apresenta o estoque de equipamentos por tipo de tecnologia considerado resultado das vendas projetadas nesse cenário.

Vendas anuais

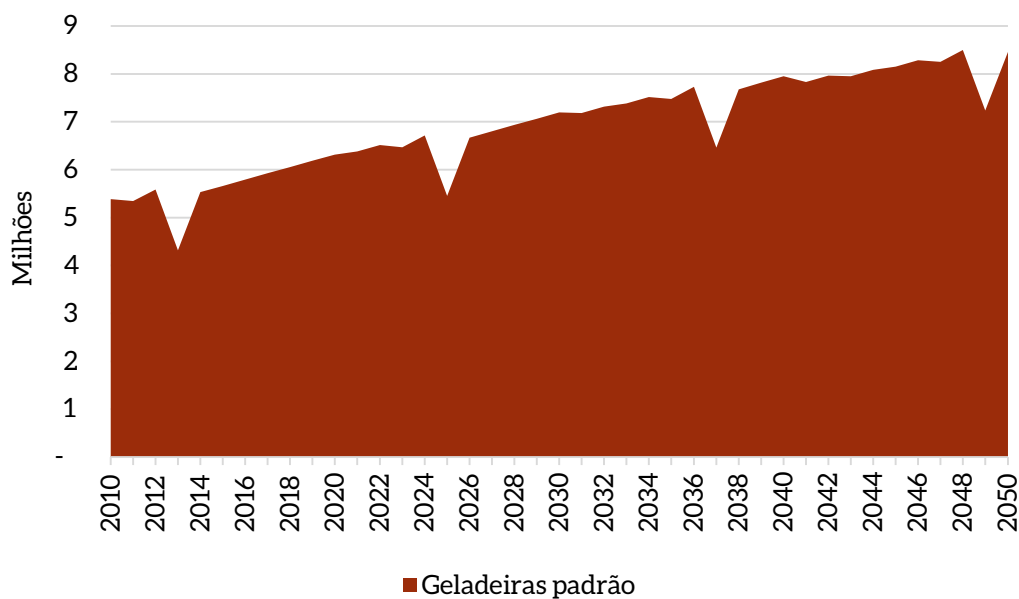


Figura 86 – Projeção de Vendas de Geladeiras no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Estoque de geladeiras

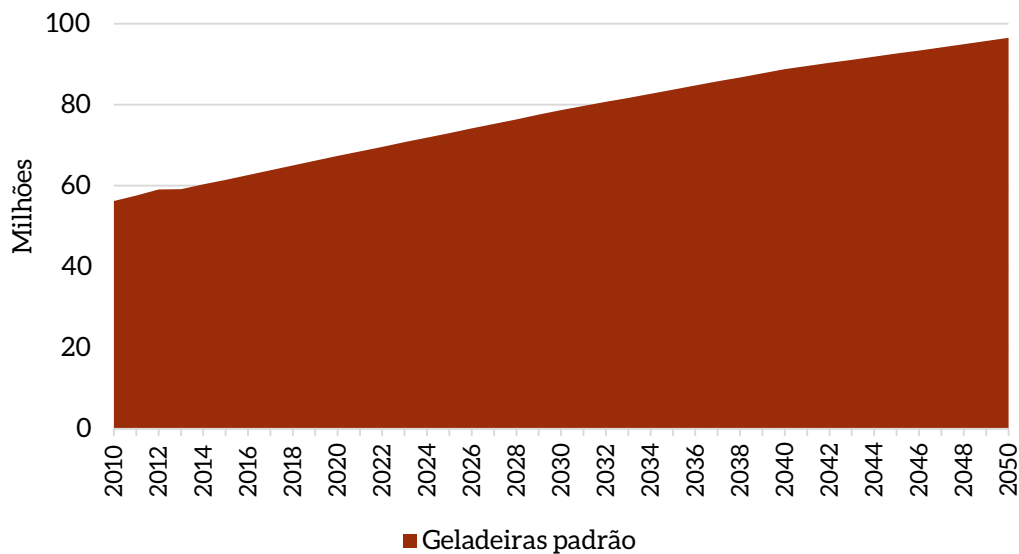


Figura 87 – Projeção de Estoque de Geladeiras no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.3.1.2 RESULTADOS

A projeção do consumo de energia das geladeiras é mostrada na Figura 88. Além do incremento dos domicílios e da posse das geladeiras no Norte e no Nordeste, outro ator importante que explica esse crescimento no consumo energético é o aumento do volume da geladeira representativa no Brasil.

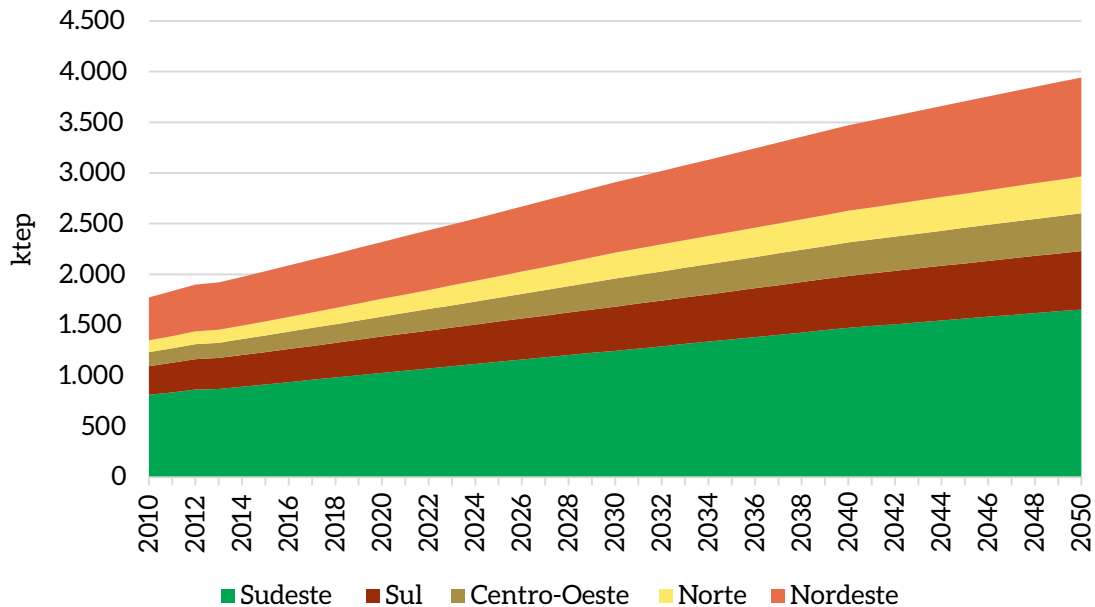


Figura 88 – Consumo de Energia das Geladeiras no Cenário REF por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.3.2 $F_{FREEZER}$

4.2.3.2.1 PREMISSAS

Para a construção do cenário REF para o consumo de energia dos *freezers*, utilizaram-se as seguintes premissas:

- A posse média de *freezers* no Brasil se mantém em 2050 igual à do ano-base;³⁹
- A eficiência média dos *freezers* existentes no Brasil, em 2050, seria equivalente à do melhor rendimento dos aparelhos atuais nas tabelas do Inmetro (2014), que é de 1,64 kWh/L-ano.

Na Figura 89 e na Figura 90, é possível observar os rendimentos atuais dos *freezers* verticais e horizontais com Selo Procel. As letras representam as categorias de classificação segundo eficiências das tabelas Inmetro (2014b).

³⁹ Segundo nossa premissa, não existiria razão para aumentar a necessidade de estocagem de alimentos nos domicílios.

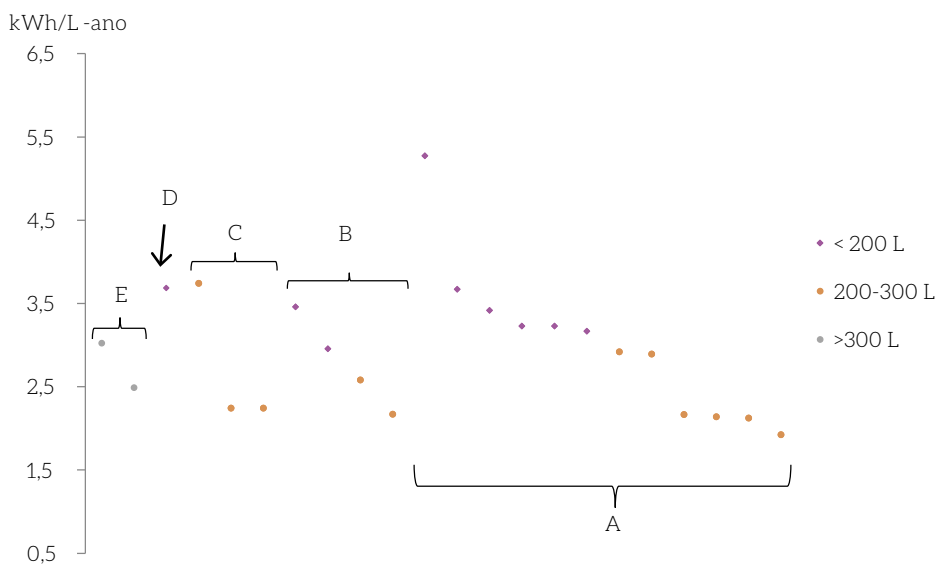


Figura 89 – Rendimentos dos Freezers Verticais das Tabelas Inmetro (2014)

Fonte: INMETRO, 2014

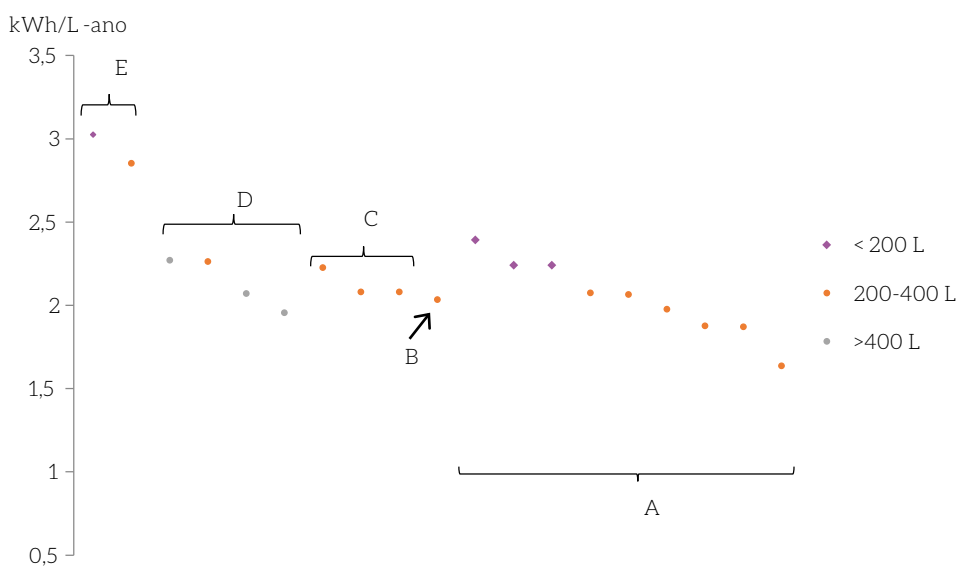


Figura 90 – Rendimentos dos Freezers Horizontais das Tabelas Inmetro (2014)

Fonte: INMETRO, 2014

As vendas e o estoque de *freezers* no Brasil são apresentados na Figura 91 e na Figura 92, respectivamente.

Vendas anuais

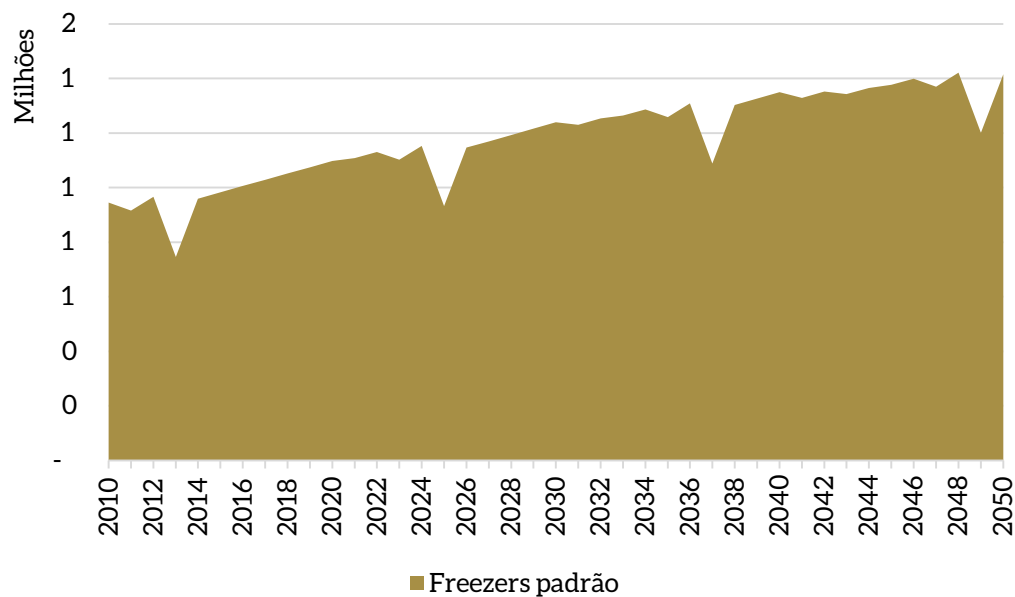


Figura 91 – Projeção de Vendas de Freezers no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Estoque de freezers

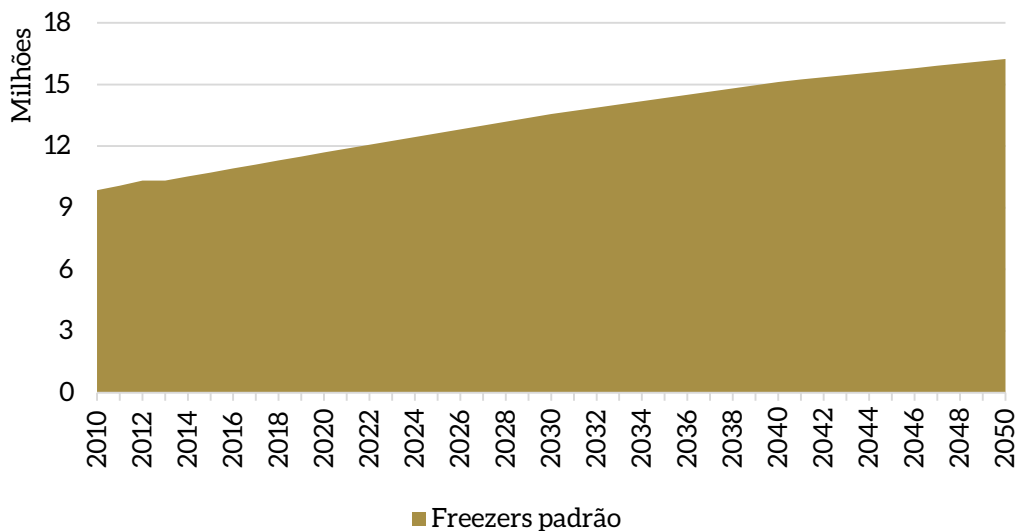


Figura 92 – Projeção de Estoque de Freezers no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.3.2 RESULTADOS

O consumo de energia dos *freezers* também foi calculado (Figura 93). O incremento do número de domicílios é a única variável que explica o aumento no consumo de energia para os *freezers*.

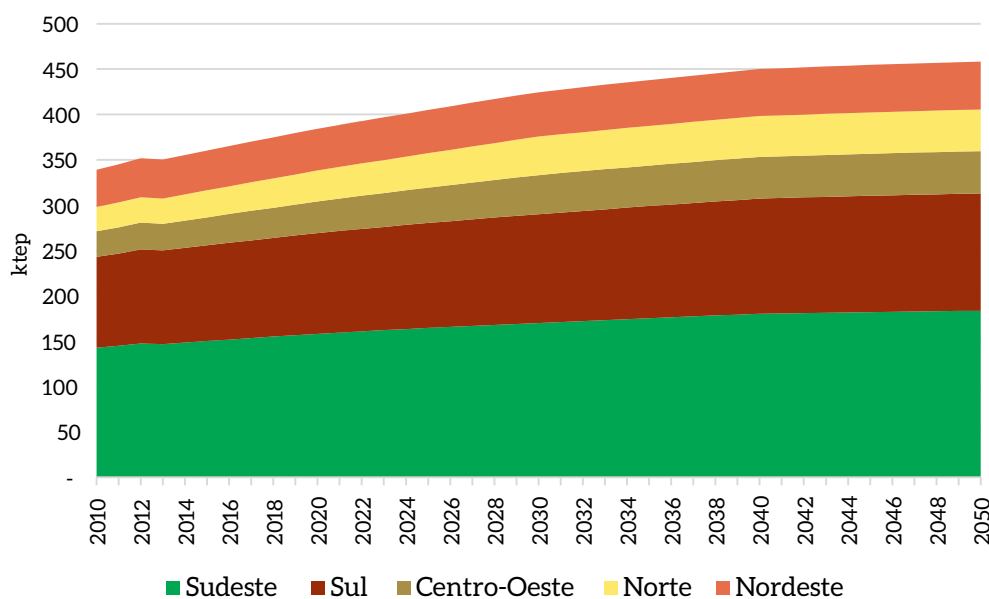


Figura 93 – Consumo de Energia dos *Freezers* no Cenário REF por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.3.3 RESULTADOS AGREGADOS PARA REFRIGERAÇÃO

Por fim, na Figura 94, pode-se observar o consumo de energia do serviço energético de refrigeração no setor residencial brasileiro como resultado da soma do consumo de geladeiras e *freezers*.

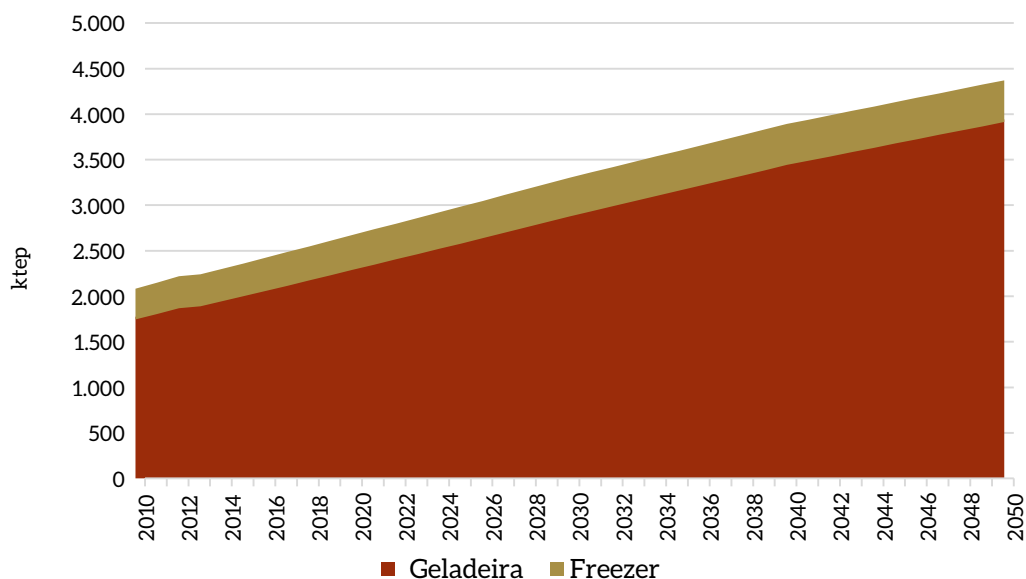


Figura 94 – Consumo de Energia do Uso Refrigeração no Cenário REF por Equipamento (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.4 Cocção

A projeção do consumo energético da cocção no cenário REF seguiu a mesma metodologia da construção do ano-base, variando os parâmetros utilizados no modelo *bottom-up* (Equação 11).

4.2.4.1 PREMISSAS

A participação de cada energético (%energético) na cocção foi obtida no *Estudo de Demanda de Energia*, para o PNE 2050 (EPE, 2014a). Assumiu-se que a penetração de cada energético para cocção evoluiria de forma linear até alcançar o valor proposto em 2050 pela EPE (2014a), conforme a Figura 95.

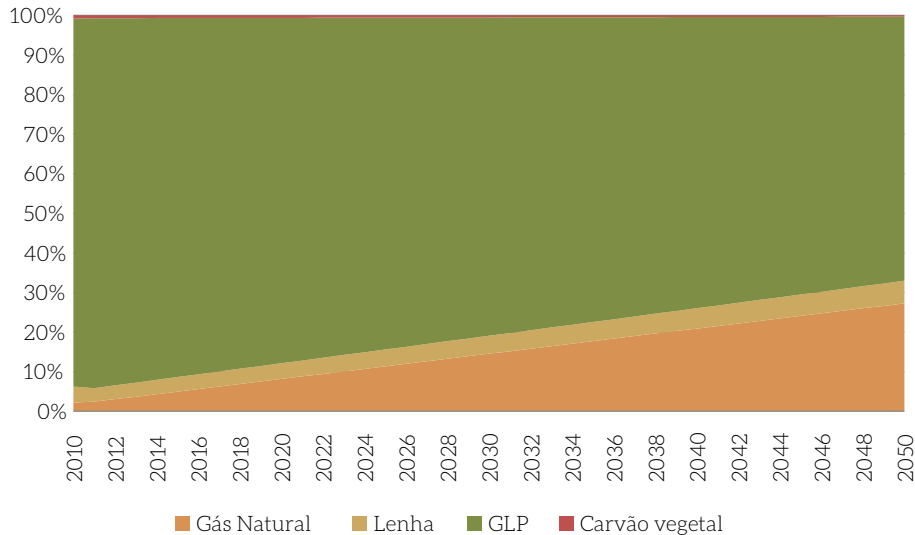


Figura 95 – Participação dos Energéticos na Cocção no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria com base em EPE, 2014a; IBGE, 2010; 2012a

Ao longo do período analisado, a mudança mais notável é a perda de participação do GLP, substituído principalmente pelo gás natural.

Apesar de o valor de consumo energético específico *per capita* não apresentar, historicamente, variações elevadas (SCHAEFFER et al., 2003), o que tornaria adequado manter essa variável fixa durante o período de projeção, optou-se por refinar o valor dessa variável. Para tal, analisou-se a série histórica de 2002 a 2011 e foi realizada uma minimização do erro quadrático para determinar qual valor de consumo específico de cada energético melhor representaria essa série histórica.

Os consumos específicos *per capita* calculados podem ser vistos na Tabela 64.

Tabela 64 – Consumo Específico Per Capita na Cocção no Cenário REF

Energético	tep/habitante	MJ/hab./dia
Gás natural	0,026	3,0
Lenha	0,722	82,8
GLP	0,035	4,0
Carvão vegetal	0,246	28,2

Fonte: Elaboração própria

De modo a permitir a consistência com o ano-base e também utilizar o consumo específico que melhor descreve o passado recente, foi definido um período de adaptação em que os consumos específicos passariam de seus valores no ano-base àqueles dispostos na Tabela 64. Admitiu-se que, a partir de 2020, o consumo específico manter-se-ia constante (Figura 96).

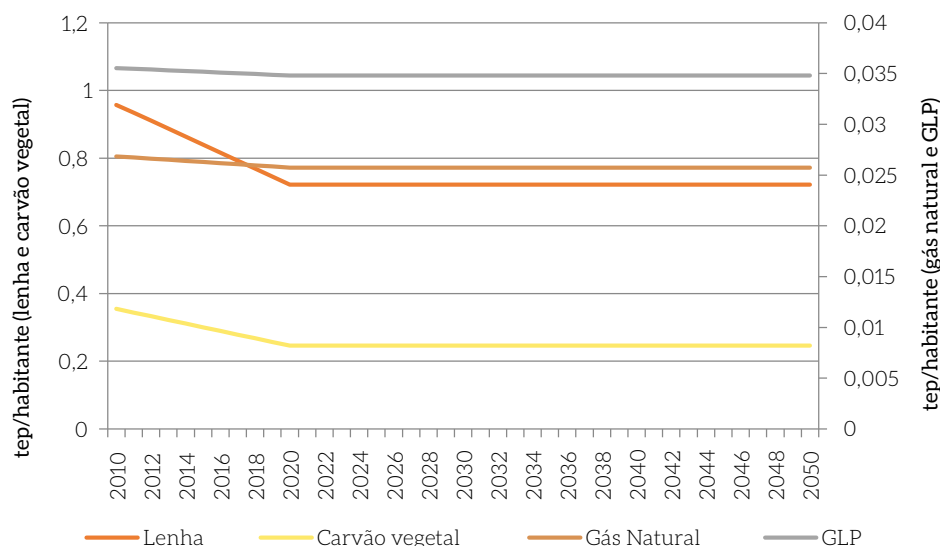


Figura 96 – Consumo Específico *Per Capita* na Cocção no Cenário REF por Energético (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.2.4.2 RESULTADOS

Dadas as premissas estabelecidas, o resultado pode ser observado na Figura 97. O consumo energético total da cocção atinge 16.329 ktep em 2050. O aumento no consumo energético observado de 2010 a 2050 é de aproximadamente 16%, equivalente a um aumento anual de aproximadamente 0,4%.

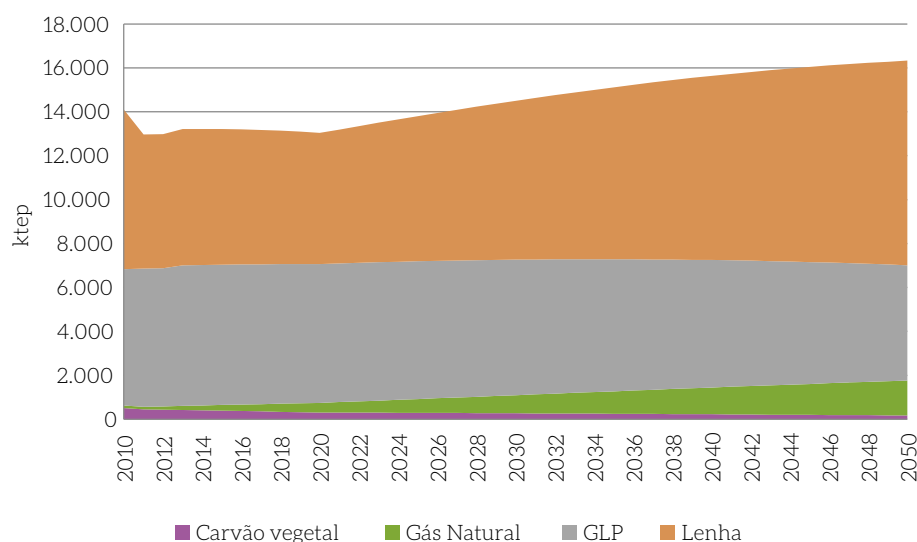


Figura 97 – Consumo de Energia do Uso Cocção no Cenário REF por Energético (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Nos anos iniciais do horizonte de tempo, o consumo energético total de cocção reduz-se, fruto de um menor uso da lenha nos domicílios brasileiros de 2010 a 2011 (passando de 4% dos domicílios a 3,4% – redução percentual de 15% em sua participação nos domicílios). Devido à ineficiência de conversão da energia da lenha em energia útil,⁴⁰ a lenha, apesar de pouco relevante em termos de número de domicílios, é o energético mais consumido em valores absolutos na cocção. Com maior penetração do gás natural, o GLP também é progressivamente substituído, porém mantém-se como segundo energético mais consumido nesse uso final.

4.2.5 AQUECIMENTO DE ÁGUA

As projeções realizadas no cenário REF do aquecimento de água utilizaram a mesma linha de raciocínio da cocção, baseando-se na Equação 13. Ao variar os parâmetros dessa equação para o período analisado, projeta-se o consumo de energia para tal uso.

4.2.5.1 PREMISSAS

A participação de cada energético (%energéticos) no uso final é um parâmetro complexo para se estabelecer para as próximas décadas, especialmente no aquecimento de água, em que há poucos dados disponíveis até no ano-base.

Contudo, constam do estudo de demanda da EPE (2014a) projeções para os anos 2020, 2030, 2040 e 2050 (além de dados para 2013), em que a perspectiva de penetração do aquecimento solar de água da EPE para 2050 ultrapassa 20% do total de domicílios em 2050 (equivalente a aproximadamente 20 milhões de domicílios utilizando essa fonte de energia). Como essa perspectiva prevê a expansão das políticas atuais de fomento ao sistema de aquecimento solar (EPE, 2014a), essa projeção não seria adequada à construção de uma linha de base, tendo sido utilizada para a construção do cenário BC, descrito adiante. Dessa forma, algumas adaptações se fizeram necessárias.

Em primeiro lugar, optou-se por manter constante a penetração do SAS com dados de 2013 (5,0% dos domicílios) para todo o período. Outras informações foram obtidas no próprio estudo da EPE (2014a), como a penetração de GLP e domicílios sem aquecimento de água. Quanto ao gás natural, assumiu-se que todos os domicílios que utilizam gás natural para a cocção o utilizariam também para aquecer água. Por fim, chuveiros elétricos seriam utilizados em todos os demais domicílios em que não se usam as demais fontes de energia (Figura 98).

40 Energia útil é a parcela da energia transformada em serviço energético pelo usuário final. Trata-se, portanto, da energia de que dispõe o consumidor depois da última conversão feita nos seus próprios equipamentos, ou seja, a energia final (a energia fornecida aos equipamentos) diminuída das perdas na conversão. É considerada como a energia transformada no trabalho desejado pelo consumidor (iluminação, força motriz, refrigeração etc.).

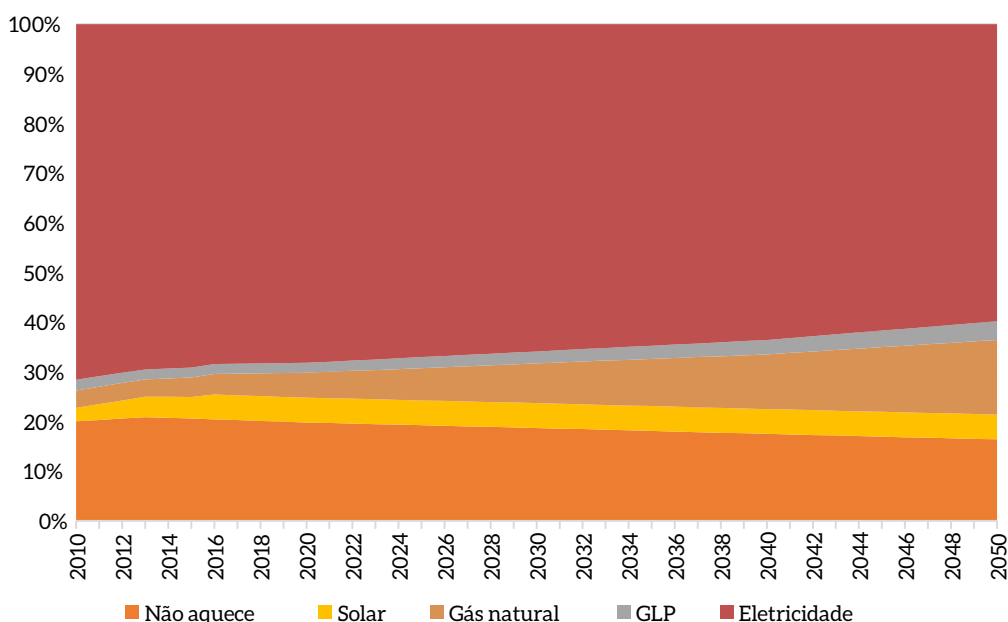


Figura 98 – Participação das Fontes de Energia no Aquecimento de Água (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Com o aumento de uso do gás natural, a eletricidade perde participação e chega a 2050 em pouco menos de 50% dos domicílios brasileiros, enquanto o gás natural alcança aproximadamente 27% das residências. O percentual de casas sem aquecimento solar diminui, de 20%, em 2010, a 16%, em 2050. O uso de GLP sofre poucas mudanças e o de aquecedores solares fica estagnado.

A variável de consumo específico (tep/habitante), de forma semelhante à cocção, passa por um período de adaptação durante a década 2010-2020, quando então seu valor estabiliza-se para o restante do horizonte de tempo analisado (Figura 99).



Figura 99 – Consumo Específico Per Capita no Aquecimento de Água (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A partir de 2020, assume-se a média do consumo específico para o período no qual havia relativa disponibilidade de dados⁴¹ (2005-2013), conforme a Tabela 65.

Tabela 65 – Consumo Específico Médio *Per Capita* no Aquecimento de Água (2010)

Fonte Energética	tep/hab.ano	MJ/hab./dia
Gás natural	0,021	2,440
GLP	0,022	2,548
Eletricidade	0,012	1,388
Solar*	0,003	0,347

Fonte: Elaboração própria

Nota: * Assumiu-se uma fração solar média de 75% para o Brasil, conforme Cardoso e Nogueira (2011), aplicada sobre o consumo específico da eletricidade.

4.2.5.2 RESULTADOS

O consumo de energia do SAS assumiu uma fração solar média de 75% para o Brasil, conforme Cardoso e Nogueira (2011), aplicada sobre o consumo específico da eletricidade (chuveiro elétrico). Dessa forma, o resultado obtido foi um consumo de 2.342 ktep para o aquecimento de água em 2050.

Como é possível observar pela Figura 100, a eletricidade permanece como o maior consumidor de energia no aquecimento de água durante todo o período analisado. Contudo, é nítido o aumento da participação do gás natural.

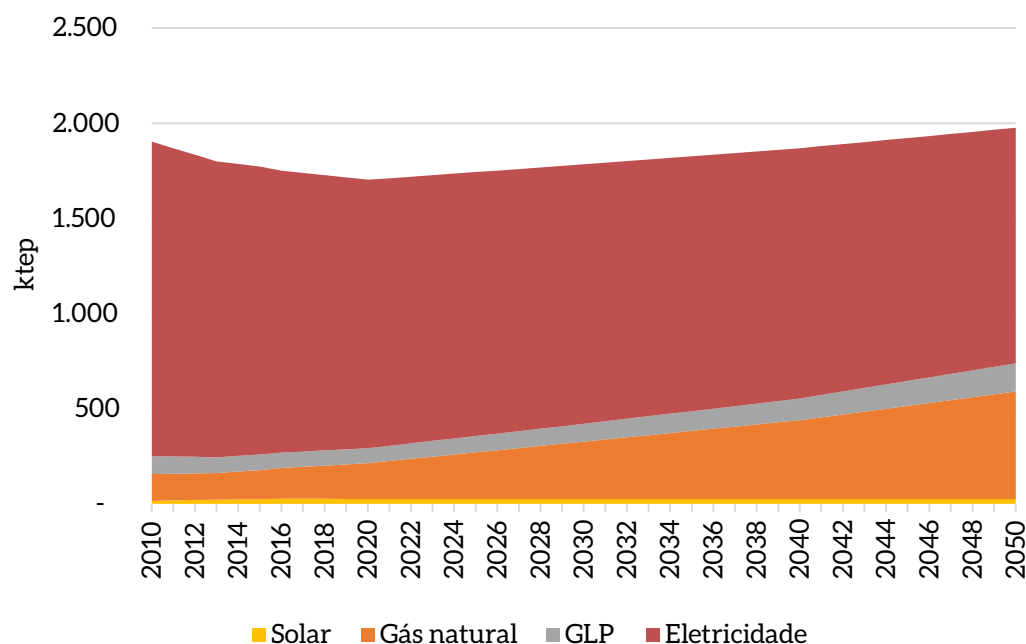


Figura 100 – Consumo de Energia do Aquecimento de Água no Cenário REF por Energético (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

⁴¹ Devido à indisponibilidade de dados, não foi utilizada uma minimização do erro quadrático.

4.2.6 OUTROS USOS

O cenário REF para outros usos foi construído levando em consideração as equações 14, 15 e 16 já observadas na seção 3.3.2.6.

4.2.6.1 PREMISSAS

Conforme já discutido, para o ano-base 2010, existem quatro equipamentos que consomem 76% do total da energia na categoria outros usos: televisão (34%), ferro elétrico (24%), computador (12%) e máquina de lavar (7%). Os outros aparelhos da categoria consomem os outros 24%. Tendo isso em vista, o cenário REF de outros usos teve como base duas metodologias. Para o cálculo do consumo de energia dos quatro principais aparelhos (televisão, ferro, computador e máquina de lavar), usou-se uma abordagem *bottom-up*. A abordagem considera parâmetros de posse média, potência e horas de uso, alterando apenas a posse para o cálculo do cenário REF.

Quanto ao consumo dos aparelhos que representam os outros 24% do consumo total de outros usos em 2010, projetou-se segundo uma elasticidade-renda.⁴² Assim, ajustou-se econometricamente o consumo de energia em função do consumo das famílias, obtendo como resultado uma elasticidade de 0,27. Isso significa que, ante um acréscimo de 1% no consumo das famílias, o consumo de energia aumentaria em 0,27%. A mudança percentual da variável explicativa (consumo das famílias) corresponde às estimativas dos cenários de Haddad (2015) desde o ano 2010 até 2050 a cada cinco anos.

No tocante à posse média dos quatro aparelhos citados, foi utilizada a metodologia a seguir.

4.2.6.1.1 TELEVISÃO

Foram interpolados valores para o período compreendido entre 2010 e 2050, considerando a posse média de televisão em 2010 por região e os valores de posse média calculados para o ano 2050 com base na informação contida em EPE (2014a). Segundo EPE (2014a), para 2050, espera-se uma posse de 2,32 televisores/domicílio no Brasil (Tabela 66). Assim, os resultados de posse média de televisores para os anos 2010 e 2050 por região são:

Tabela 66 – Evolução Posse de Televisão no Cenário REF por Região (2010-2050)

Região	2010	2020	2030	2040	2050
Sudeste	1,5	1,70	1,93	2,17	2,4
Sul	1,6	1,92	2,20	2,49	2,8
Centro-Oeste	1,2	1,54	1,84	2,14	2,4
Norte	1,2	1,37	1,58	1,80	2,0
Nordeste	1,3	1,44	1,58	1,71	1,9
Brasil	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3

Fonte: Elaboração própria

⁴² A elasticidade-renda da demanda define-se como $\epsilon_R = \frac{\Delta \text{Consumo das famílias}}{\text{Consumo das famílias}} \cdot \frac{\text{Consumo de energia}}{\Delta \text{Consumo de energia}}$. A elasticidade-renda obtida revela que a energia é um bem normal por ser o resultado positivo, além de ser essencial, por ser menor que 1.

4.2.6.1.2 FERRO ELÉTRICO

A fim de estimar a posse de ferro elétrico até o ano 2050, foi utilizada a taxa de crescimento das vendas desse aparelho entre 2011 e 2012 reportado por IBGE (2014a) como sendo a taxa de crescimento da posse.

Segundo a Pesquisa Anual de Produto feita pelo IBGE (2014a), as vendas de ferro elétrico foram de R\$ 147.968,00 e R\$ 162.643,00, o que revela aumento de 9,9% nas vendas entre esses dois anos. Além disso, adotou-se como premissa que os domicílios não possuem mais de um ferro, razão pela qual a posse máxima é de 1 ferro/domicílio.

4.2.6.1.3 COMPUTADOR

Para calcular a posse de computadores entre os anos 2010 e 2050, utilizou-se a taxa de crescimento entre 2011 e 2012 do número de domicílios com microcomputador segundo informação do IBGE (2014b).

A taxa de crescimento usada por região é a seguinte: Sudeste – 9,5%; Sul – 6,8%; Centro-Oeste – 10,7%; Norte – 15,5%; Nordeste – 18,6%. Adotou-se como restrição que o número máximo de computadores por domicílio corresponderia ao número de pessoas por domicílio. Levando em consideração essas premissas, a evolução estimada da posse de computador por região é apresentada na Tabela 67.

Tabela 67 – Evolução Posse de Computador no Cenário REF por Região (2010-2050)

Região	2010	2020	2030	2040	2050
Sudeste	0,58	1,44	2,74	2,51	2,32
Sul	1,33	2,56	2,70	2,48	2,29
Centro-Oeste	0,85	2,34	2,65	2,44	2,25
Norte	0,52	2,20	2,40	2,18	2,01
Nordeste	0,69	3,78	2,74	2,49	2,30
Brasil	0,79	2,46	2,65	2,42	2,23

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que, em 2030, se atinge a máxima saturação de computadores nos domicílios brasileiros. Nesse sentido, a partir desse ano, a posse por domicílio vê-se diminuída como consequência da queda das pessoas por domicílio. Contudo, essa queda é compensada com o aumento do número de domicílios brasileiros.

4.2.6.1.4 MÁQUINA DE LAVAR

A posse média de máquina de lavar em 2050 segue a informação reportada em EPE (2014a), que corresponde a 0,94 máquinas/domicílio. No caso desse equipamento, a posse para o Brasil no ano-base é de 0,63, sendo que os valores de posse para os anos entre 2010 e 2050 foram interpolados, partindo do ano-base e chegando em 0,94. Salienta-se que a modelagem feita usou os mesmos valores para todas as regiões.

4.2.6.2 RESULTADOS

Os resultados do uso das duas metodologias utilizadas para outros usos são apresentados na Figura 101. Observa-se crescimento da demanda de energia por outros usos, passando de 3.484 ktep para 8.751 ktep, o que representa crescimento de 151% entre os anos 2010 e 2050.

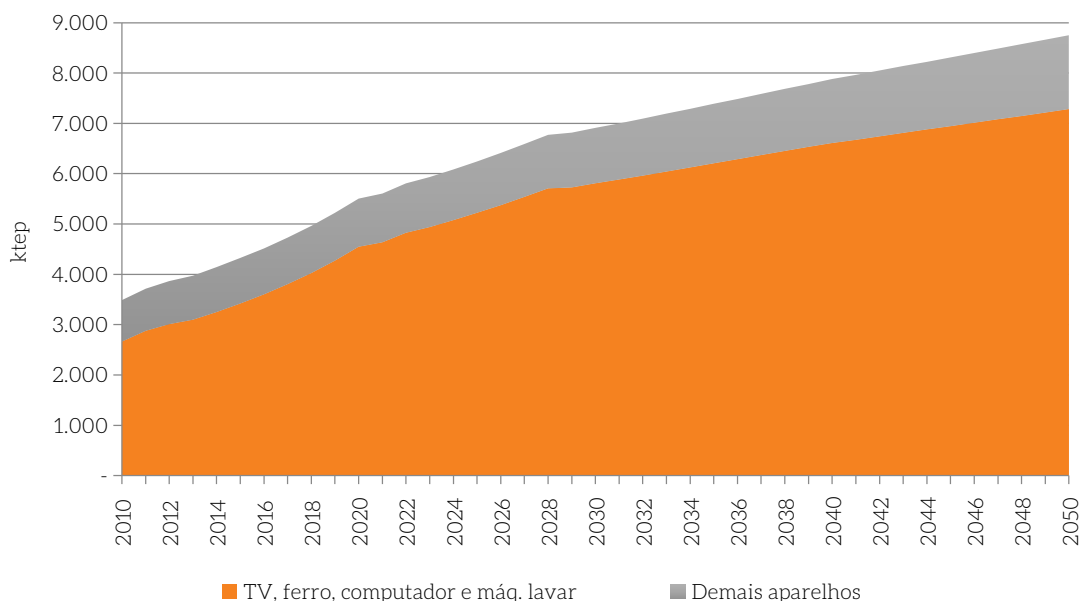


Figura 101 – Consumo de Energia dos Outros Usos no Cenário REF por Tipo de Equipamento (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.3 SETOR COMERCIAL E SERVIÇOS

Dados desagregados para a estrutura de consumo do setor, no Brasil, são inexistentes – como já mencionado. Por esse motivo, a construção do cenário REF utilizará uma estrutura *top-down* simplificada, consistindo de:

- Análise do histórico do consumo de energia no período entre 2002 e 2013 e sua correlação com uma variável exógena de atividade. Esse período foi selecionado para excluir os efeitos do racionamento de eletricidade ocorrido em 2001;
- Estimativa do consumo futuro, considerando evolução de variável exógena disponível.

Para o setor comercial, foram testadas diferentes variáveis exógenas, sendo que a que apresentou melhor coeficiente de correlação com o consumo energético foi o PIB do setor, representado no BEN (EPE, 2014). Adotou-se um ajuste polinomial, com grau dois, com resultados satisfatórios para o consumo total e o consumo de eletricidade. Sendo esta a fonte mais relevante para o setor, foi assumido como satisfatórios os resultados alcançados.

Como o resultado para o consumo de combustíveis apresentou baixa correlação, a projeção referencial será construída com estimativa do consumo total e de eletricidade, sendo o de combustíveis obtido por diferença. A Figura 102 apresenta os resultados dessas análises simplificadas das séries energéticas e sua correlação com o PIB do setor.

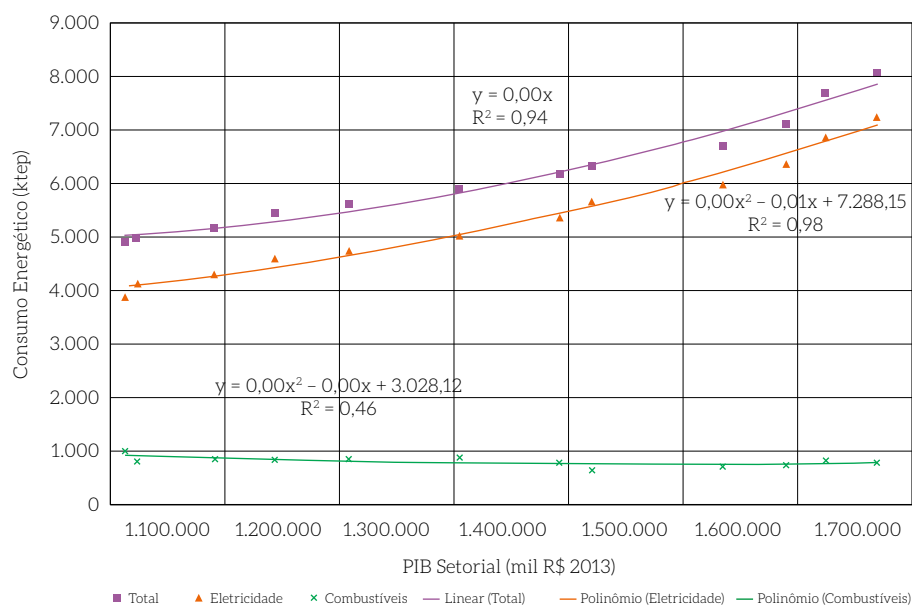


Figura 102 – Correlação entre Consumo Energético e PIB

Fonte: Elaboração própria

Uma forma mais conveniente para visualizar a relação entre variação do PIB setorial e o consumo total de energia é com a utilização de números índices, que permitem obter uma “elasticidade” entre o crescimento do valor adicionado e o do consumo de energia. A Figura 103 mostra essa representação, com tendência linearizada.

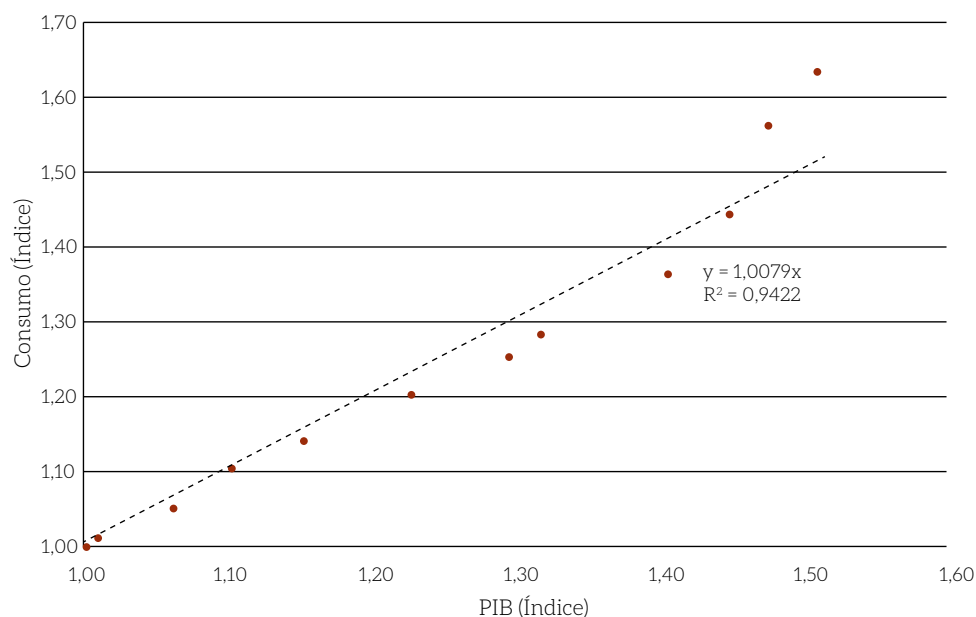


Figura 103 – Correlação entre Consumo Energético e PIB (números índices)

Fonte: Elaboração própria

Obtidas as fórmulas gerais para variação do consumo total em função do PIB setorial, as projeções macroeconômicas elaboradas por Haddad (2015) foram aplicadas para o horizonte 2050, com as seguintes considerações:

- Para a tipologia de edificação “escolas”, é considerada a evolução do valor adicionado para o segmento “educação mercantil”. O mesmo vale para “hospitais”, que têm como referência a variação no valor adicionado de “saúde mercantil”, e “hotéis” e “restaurantes” com “serviços de alojamento e alimentação” como referência;
- As demais tipologias têm “comércio” como referência na evolução da atividade;
- Embora haja dados disponíveis para 2013, optou-se por construir a linha de base a partir de 2010 – ano de referência considerado neste relatório.

Adicionalmente, foram considerados para todas as tipologias:

- Utilização de equipamentos de iluminação mais eficientes, com consolidação da tecnologia LED, representando 20% de redução (relativa) do consumo até 2050, com relação a 2010;
- Aumento no uso de equipamentos de climatização, alcançando 10% adicionais até 2050, com relação a 2010.

Para estimar o uso de energia em climatização no setor comercial e serviços, utilizou-se uma abordagem que considera como nível de atividade a área útil das edificações e uma participação de área climatizada na área útil total.

Essa abordagem é uma estimativa indireta, considerando que no setor comercial não se conta com estatísticas desagregadas de vendas ou de posse de equipamentos de ar-condicionado. Adicionalmente, só se considera a climatização por ar-condicionado, desconsiderando os ventiladores. A Equação 18 é aplicada para calibrar o ano-base.

$$CE_{\text{climatização}^*} = \sum_j \text{área}_j \cdot \text{taxa de climatização}_j \cdot CT \cdot \% \text{participação}_{j,z} \cdot COP_z \quad (18)$$

Em que,

$CE_{\text{climatização}}$: representa o consumo de energia devido aos equipamentos de climatização no Brasil, no setor comercial e serviços;

j: é o tipo de estabelecimento;

z: representa o tipo de sistema de ar-condicionado (centralizado ou individual);

COP_z : é o coeficiente de performance para o tipo de sistema de ar-condicionado; e

CT: é a carga térmica por metro quadrado (com uma capacidade térmica de 0,29 kW/m²).

A carga térmica foi calculada com a mesma metodologia que o setor residencial, com a diferença de que o aparelho fica ligado das 9 horas até as 21 horas,⁴³ e com regulação de temperatura conforme um comportamento “austero” do uso de energia (HONG, 2014).

43 No caso do setor residencial, o aparelho era ligado quando se superava a temperatura externa dos 28°C.

Para estimar a taxa de área climatizada no ano-base, utilizaram-se dados estimados de consumo de energia no setor comercial para climatização, para o ano 2010, fornecidos pela Agência Internacional de Energia para o Brasil. Isso resultou em um valor de 21% para o ano-base. Para 2050, foi projetada uma taxa de área climatizada seguindo uma função “S” até atingir, em 2050, o valor do setor comercial e serviços dos Estados Unidos, em 2003 (83%), observado na Figura 104 (EIA, 2008).

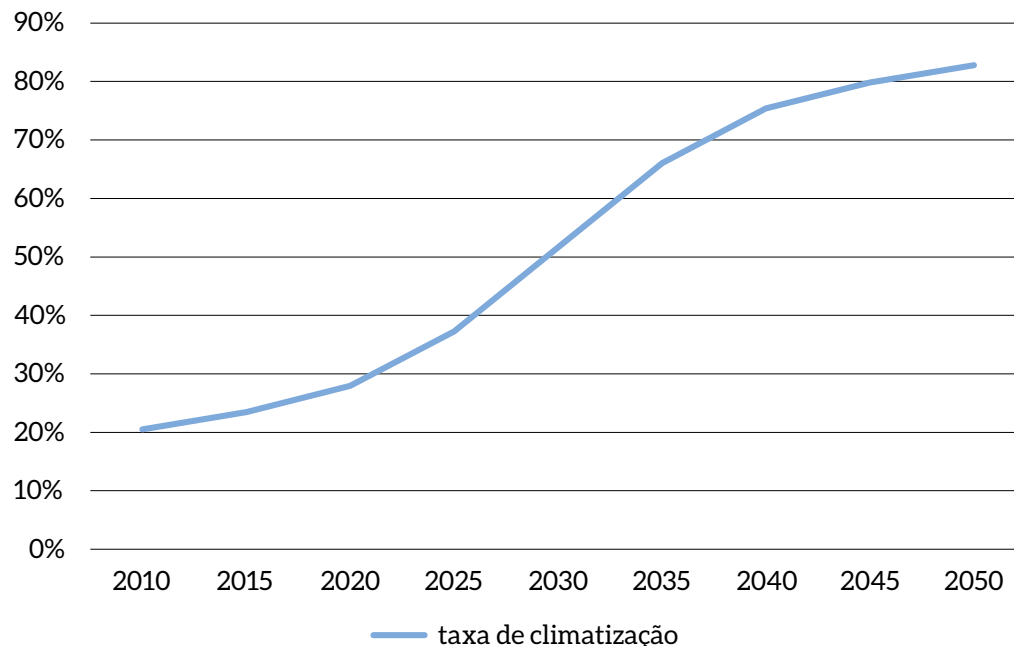


Figura 104 – Taxa de Climatização Projetada para o Setor Comercial e Serviços (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Para ar-condicionado no setor comercial e serviços, utilizaram-se as tecnologias mostradas na Tabela 68, incluindo os custos indicados.

Tabela 68 – Características das Tecnologias para Ar-condicionado Utilizadas no Setor Comercial e Serviços

Marca	Capacidade (kW térmico)	EER
Split Padrão	2,6	3,05
Janela Padrão	2,6	3,02
Chiller Parafuso Convencional	3,5	3,74

Fonte: DOE, 2014a

Com base na projeção de área, taxa de climatização e capacidade térmica por área, foi estimada a potência térmica instalada no setor comercial e serviços. Porém, como é preciso projetar as vendas para estimar os custos de capital a cada ano, foi realizada uma estimativa das vendas a cada ano (Figura 105) em função da potência instalada projetada (Figura 106), considerando um tempo de vida de dez anos.

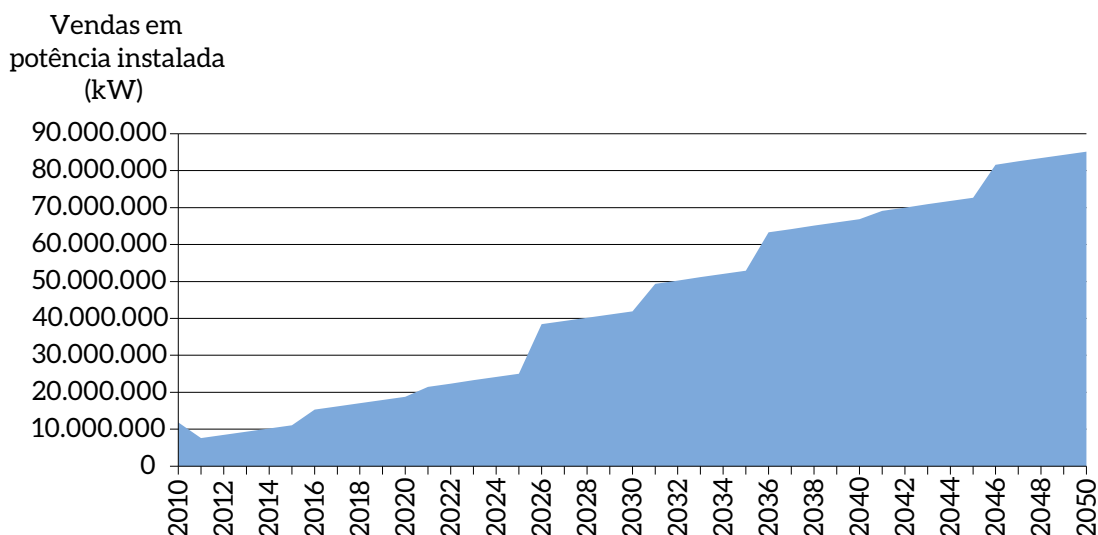


Figura 105 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

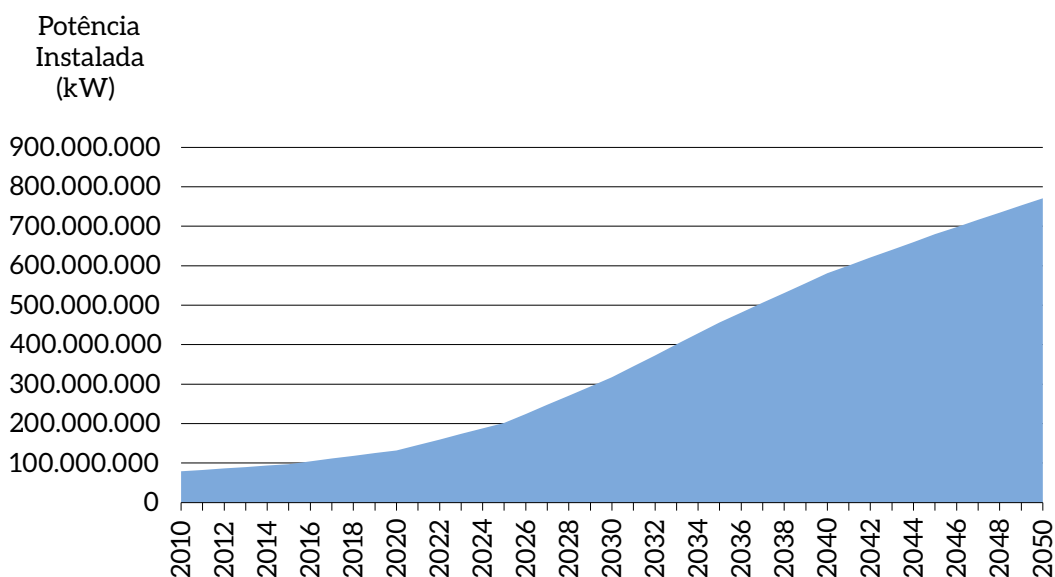


Figura 106 – Projeção de Potência Instalada de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Partindo dessas premissas, a Figura 107 mostra a projeção do consumo energético agregado para o setor até 2050.

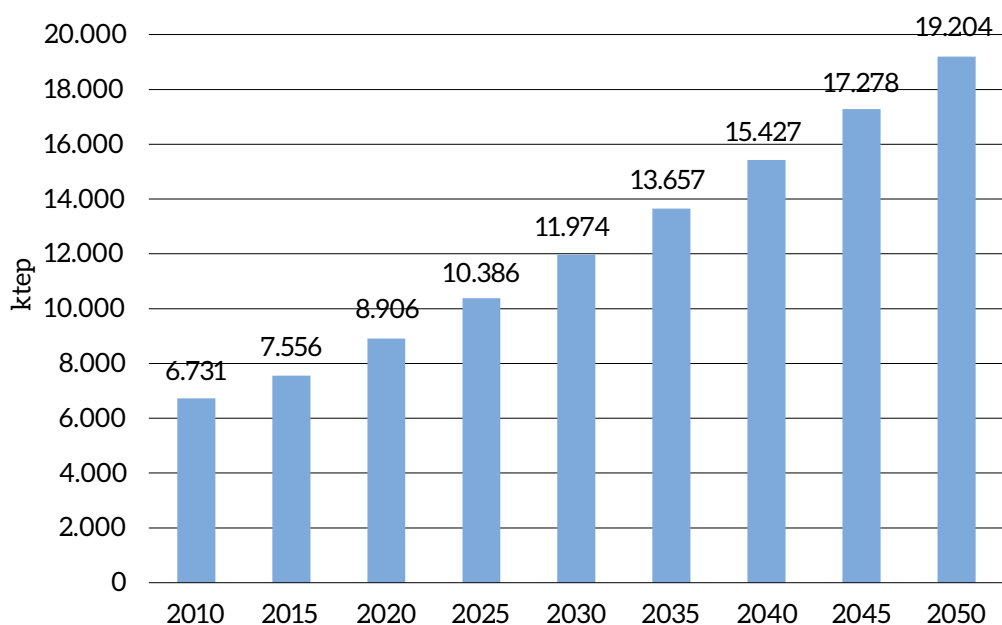


Figura 107 – Consumo Total de Energia do Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Resultados mais detalhados são apresentados na Tabela 69, para o ano 2050. A modelagem considera a mesma desagregação apresentada na caracterização do ano-base.

Tabela 69 – Consumo de Energia do Setor Comercial e Serviços no Cenário REF (2050 em ktep)

Fonte/ Uso final	Tipologia						Total
	Escolas	Restaurantes	Hospitais	Hotéis	Supermercados	Outros	
Eletricidade	132,1	1.067,3	57,9	848,4	2.584,1	11.406,6	16.096,4
Climatização	65,4	115,8	24,1	180,0	861,4	2.582,3	3.828,9
Aquecimento de água	4,2	0,0	0,6	51,7	130,5	0,0	186,9
Iluminação	34,2	203,8	24,3	427,2	417,6	6.356,4	7.463,5
Cocção	0,8	11,1	0,3	8,6	130,5	0,0	151,2
Refrigeração	6,1	659,1	2,3	51,7	652,6	541,7	1.913,4
Outros	21,6	77,5	6,4	129,2	391,5	1.926,2	2.552,4
Combustíveis	610,2	594,1	650,9	557,7	119,5	576,0	3.108,4
Aquecimento de água	370,1	226,3	450,2	501,1	29,9	60,6	1.638,2
Cocção	50,0	367,8	60,8	56,6	37,7	0,0	572,9
Climatização	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outros	190,1	0,0	139,9	0,0	51,9	515,4	897,2
Total	742,3	1.661,4	708,8	1.406,1	2.703,6	11.982,6	19.204,8

Fonte: Elaboração própria

4.4 SETOR PÚBLICO

A série energética do setor público, obtida a partir dos valores totalizados no BEN (EPE, 2015a) e retirando-se parcelas do consumo de eletricidade correspondentes a iluminação pública (EPE, 2015b) e saneamento, apresenta comportamento irregular, inclusive com reduções ao longo do período.

A correlação com a população total apresentou melhores resultados que com o PIB total, mas ainda assim com fator extremamente baixo. Observando a Figura 108, a referida irregularidade é evidente. O consumo total decresce em relação à população. No caso da eletricidade, a correlação é satisfatória.

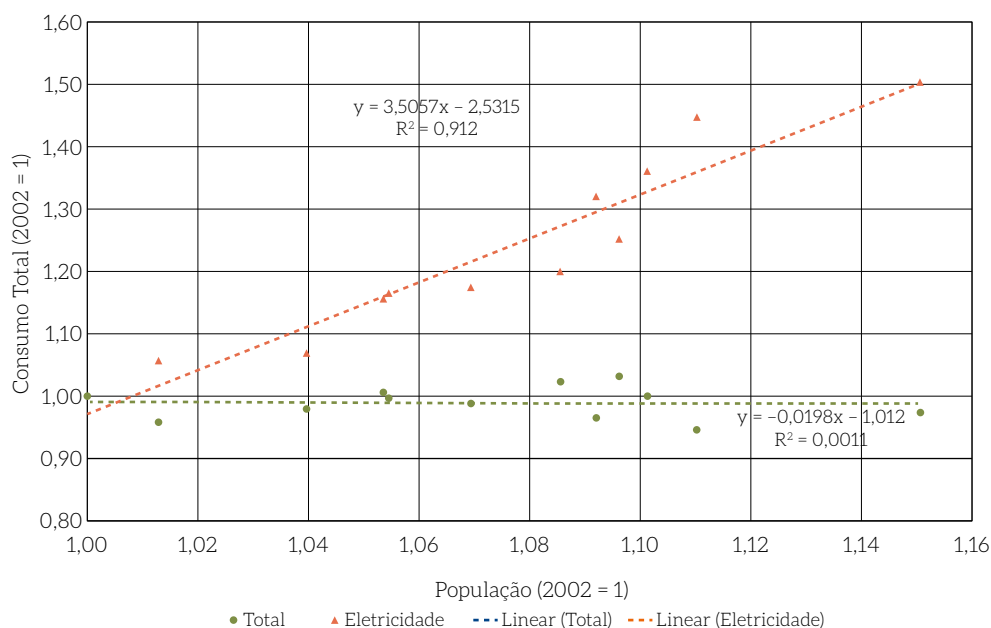


Figura 108 – Correlação entre Consumo Energético e PIB (números índices) no Setor Público

Fonte: Elaboração própria

Apesar da irregularidade, na ausência de parâmetros mais adequados, foi mantida a correlação entre o consumo energético pelo setor público (edificações, somente) com a população. Além disso, serão consideradas igualmente as premissas utilizadas para o setor comercial quanto à variação do consumo em usos finais:

- Redução de 20% no consumo com iluminação em 2050, com relação a 2010, devido à penetração de tecnologia LED de mais alta eficiência;
- Acréscimo de 10% no consumo com climatização em 2050, com relação a 2010.

A Figura 109 ilustra a evolução estimada para o consumo em prédios públicos, de 2010 a 2050. Observa-se que a metodologia aplicada permitiu aproximar os resultados do BEN no ano-base do estudo (Tabela 3), assim resultando em projeções robustas até 2050.

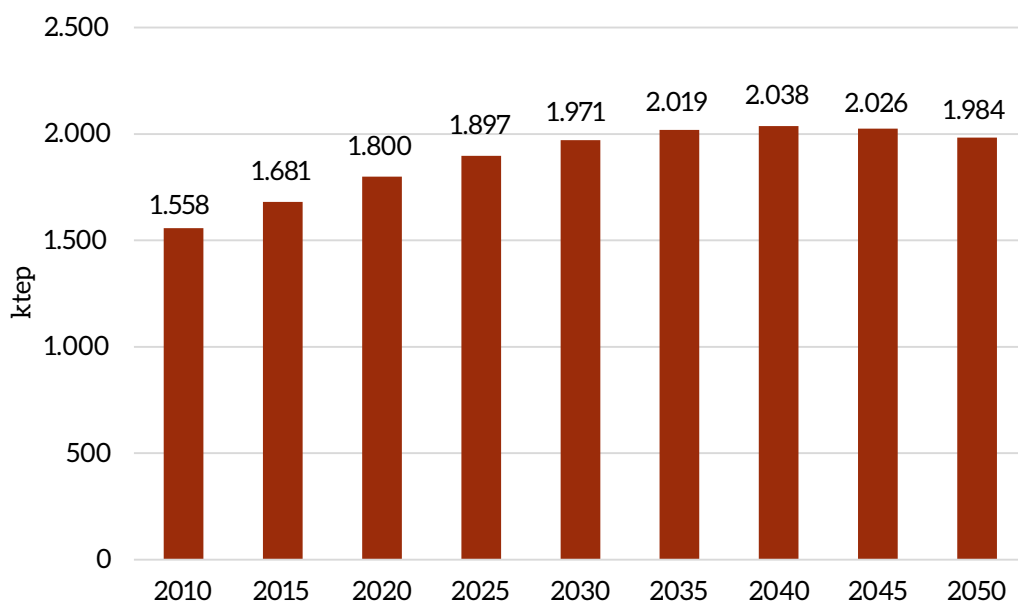


Figura 109 – Consumo de Energia em Prédios Públicos no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Os resultados por uso final são representados na Tabela 70.

Tabela 70 – Consumo de Energia Projetado em Prédios Públicos no Cenário REF (2010-2050 em ktep)

Fonte/Uso final	2010	2020	2030	2040	2050
Eletricidade	1.102,3	1.267,6	1.381,7	1.422,0	1.377,2
Força motriz	53,3	62,3	69,0	72,1	71,0
Produção de vapor	8,0	9,3	10,3	10,7	10,6
Aquecimento e cocção	16,3	19,0	21,1	22,0	21,7
Refrigeração	416,3	498,3	565,2	605,1	609,4
Iluminação	544,8	604,4	634,0	626,1	579,9
Eletroquímica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outros usos	63,6	74,3	82,2	86,0	84,6
Combustíveis	455,6	532,0	589,1	615,9	606,2
Força motriz	5,0	5,8	6,5	6,8	6,7
Produção de vapor	37,8	44,1	48,9	51,1	50,3
Aquecimento e cocção	412,8	482,0	533,7	558,1	549,3
Refrigeração	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	1.557,9	1.799,6	1.970,8	2.038,0	1.983,5

Fonte: Elaboração própria

A redução verificada entre 2040 e 2050 deve-se à combinação de dois efeitos: o aumento na eficiência de sistemas de iluminação – principal uso final do setor – e a redução da população prevista para ocorrer nesse período.

4.4.1 ILUMINAÇÃO PÚBLICA

4.4.1.1 PREMISSAS

No cenário REF, a tecnologia LED tem participação crescente, atingindo, em 2045, 80% do parque instalado, observado na Figura 110. Até 2025, há crescimento na participação do vapor de sódio e redução do vapor de mercúrio até 2025 – sendo nula a partir desse ano.

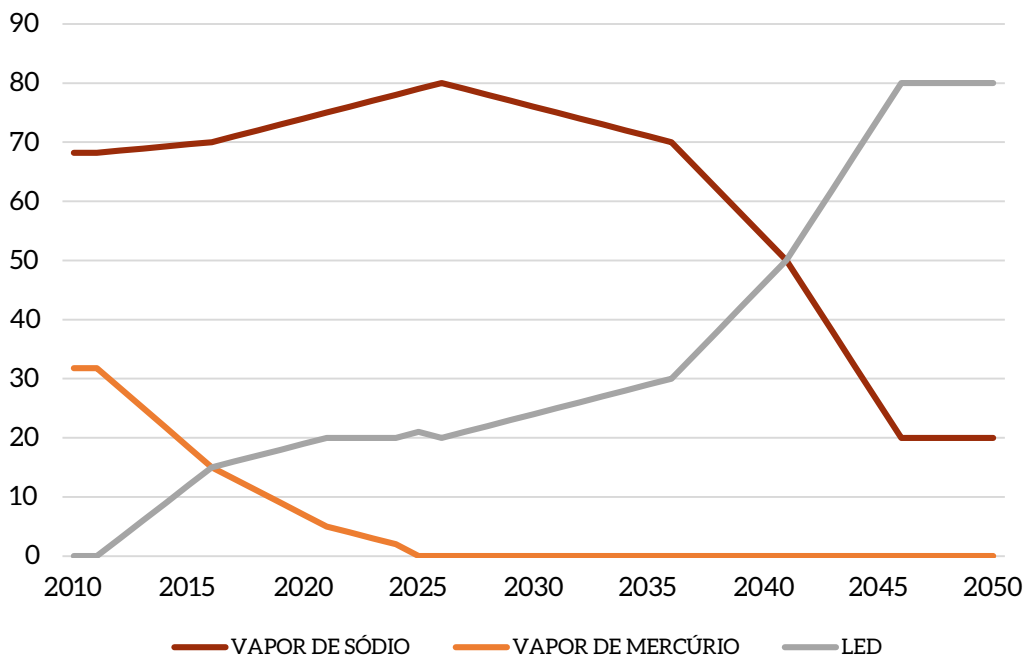


Figura 110 – Participação de Tecnologias em Iluminação Pública no Cenário REF (2010-2050 em %)

Fonte: Elaboração própria

4.4.1.2 RESULTADOS

A projeção referencial do consumo de energia decorrente da iluminação pública foi estabelecida a partir da análise de uma série temporal para o consumo (EPE, 2015b).

Foram testadas correlações entre o consumo da iluminação pública e variáveis socioeconômicas, sendo que o melhor resultado foi obtido com o PIB. A Figura 111 ilustra essa correlação, com os parâmetros representados em números índices (2007 = 1).

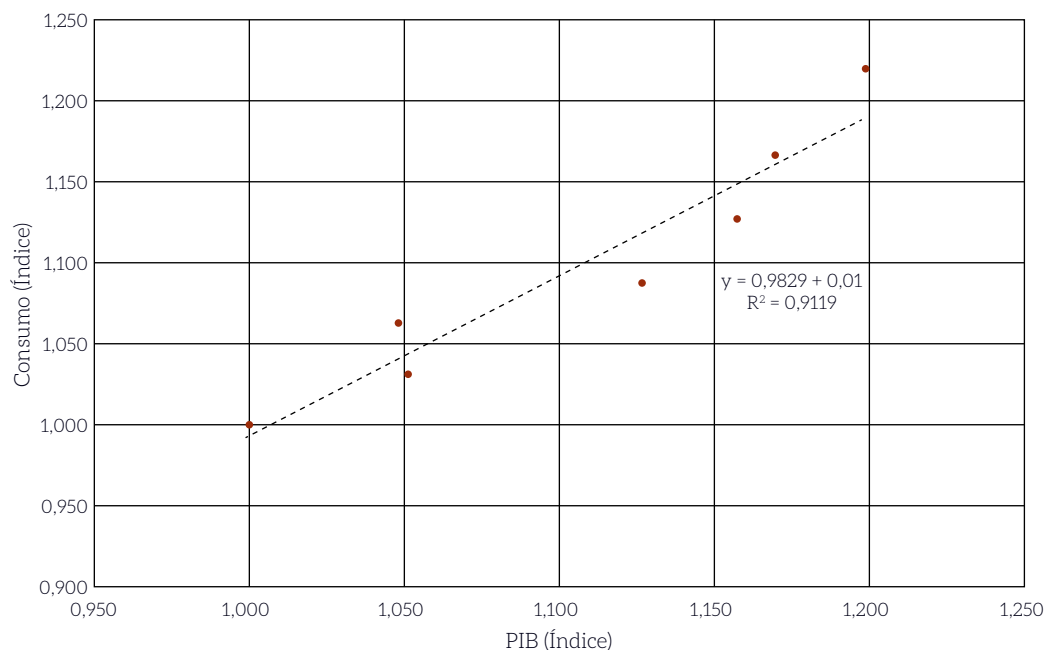


Figura 111 – Correlação entre Consumo Energético e PIB (números índices) – Iluminação Pública

Fonte: Elaboração própria

Partindo da relação obtida e de projeções do PIB apresentadas por Haddad (2015), é construído o cenário REF do consumo energético pela iluminação pública. Adicionalmente, foram considerados:

- Redução da participação no parque instalado de lâmpadas a vapor de mercúrio e mistas a uma taxa de 1% a cada ano a partir de 2015;
- Eliminação de lâmpadas incandescentes e fluorescentes até o final do período de projeção (2050);
- Redução arbitrada da participação das lâmpadas a vapor de sódio para 50% em 2050;
- Crescimento da participação de conjuntos LED, substituindo as tecnologias acima.

O resultado verificado é ilustrado na Figura 112.

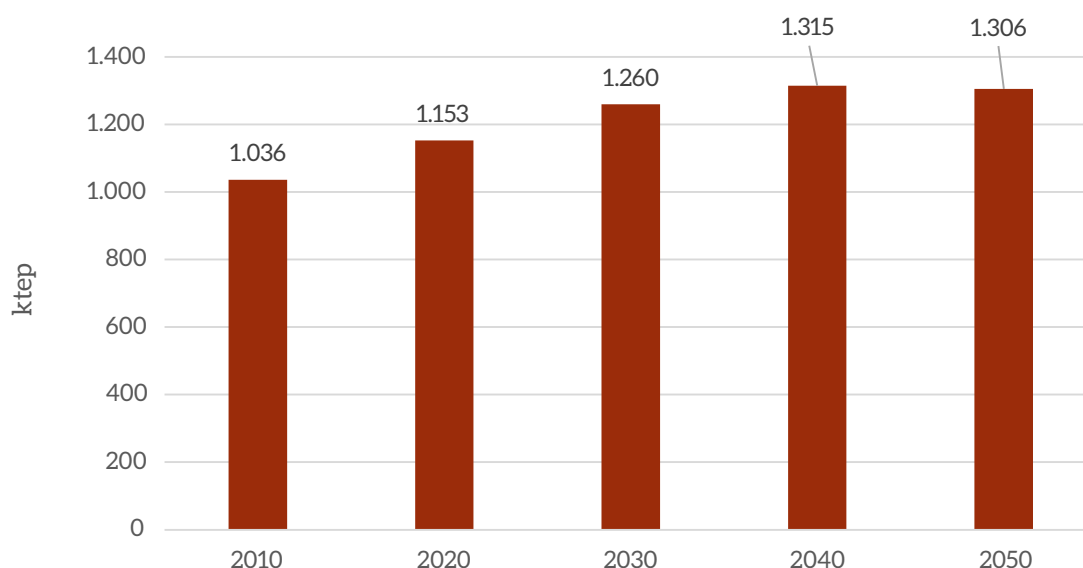


Figura 112 – Consumo de Energia da Iluminação Pública no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

O consumo energético por tipo de lâmpada é apresentado na Tabela 71. Tendo em vista as premissas assumidas, chama a atenção a representatividade do LED ao final do período de análise.

Tabela 71 – Consumo de Energia da Iluminação Pública no Cenário REF (2010- 2050 em ktep)

Tipologia	2010	2020	2030	2040	2050
Vapor de sódio	660,97	745,15	839,60	907,51	940,19
Vapor de mercúrio	334,45	334,69	272,48	165,84	18,80
Mistas	23,35	25,00	24,86	22,81	18,80
Incandescentes	8,98	8,93	7,15	4,13	0,00
Fluorescentes	3,74	3,72	2,98	1,72	0,00
Multivapor metálico	4,62	5,36	6,43	7,43	8,26
LED	0,13	29,79	106,79	205,49	319,97
Total	1.036,23	1.152,64	1.260,28	1.314,92	1.306,04

Fonte: Elaboração própria

4.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A modalidade de geração distribuída de pequeno porte encontra-se ainda em estados iniciais de desenvolvimento, tendo sido regulamentada apenas em 2012. A Resolução nº 482/12 (ANEEL, 2012) prevê as condições gerais ao acesso de geração distribuída ao sistema interligado, assim como instaura diretrizes para o mecanismo de compensação de energia elétrica. A energia injetada pela unidade consumidora à distribuidora local é posteriormente compensada, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia elétrica a ser consumida em um prazo de 36 meses.

Com base na norma, para ambas as tecnologias, uma potência máxima por domicílio foi determinada. Essa restrição se orienta pela relação entre o consumo de energia do consumidor e a geração de energia do sistema e tem como objetivo único não permitir que a demanda anual do domicílio seja menor que a geração anual de eletricidade do sistema. Essa hipótese é considerada, pois, caso contrário, o consumidor estaria suscetível a jamais recuperar parte da energia gerada pelo sistema de compensação de energia via *net metering* adotado no país.

4.5.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EÓLICA

A geração distribuída eólica de pequeno porte encontra-se em constante desenvolvimento, porém apresenta ainda relevância mínima na matriz elétrica global. Para efeito de comparação, o Reino Unido, onde a tecnologia encontra-se em estado significativamente mais avançado, tinha 1,8 MW no ano de 2013 em sistemas com até 1,5 kW e 7,4 MW para sistemas 1,5 kW – 15 kW (RENEWABLE UK, 2014; RENEWABLE UK, 2013).

A análise do potencial eólico para sistemas distribuídos de pequeno porte é ainda bastante incipiente para o caso brasileiro. Diferentemente do aproveitamento eólico de grande porte, a altura de operação desse tipo de aplicação encontra-se entre 10 e 30 metros.

No cenário REF, tem-se a penetração de turbinas de até 10 kW para aplicação nos setores residencial e comercial. Considera-se que turbinas com potencial superior a esse patamar⁴⁴ serão aplicadas, sobretudo, por autoprodutores industriais, portanto, sendo desconsideradas nesse cenário. A projeção é baseada na Equação 19.

$$\text{Eólica GD}_t = \sum_{i,j,t} \text{Residências}_{ijt} * \text{Geração}_{i,j} \quad (19)$$

Em que,

Eólica GD_t: é a geração eólica distribuída no ano (t);

i: Regiões;

j: Tipo de área (urbano/rural);

t: é o ano (2010, ..., 2050);

Residências_{ijt}: número de residências por região (i) por tipo (j) de área e no ano (t);

Geração_{i,j}: geração típica do sistema por localidade ou região (i) e tipo de área (j).

4.5.1.1 PREMISSAS

Para projetar a penetração da tecnologia, foram consideradas as seguintes premissas:

⁴⁴ Turbinas eólicas com até 1 MW.

- Regiões com densidade de potência eólica de no mínimo 400 W/m² para uma altura de 50 metros;
- Domicílios com rendimento mensal superior a 20 salários mínimos;
- Adesão em domicílios localizados em área rural a partir de 2013 e domicílios localizados em área urbana, sobretudo, a partir de 2030. Assumiu-se que 80% dos domicílios rurais e 35% de edificações urbanas vão aderir à tecnologia no horizonte de estudo (em regiões onde as restrições mínimas do recurso eólico e de rendimento domiciliar são atendidas);
- A adesão ocorre inicialmente em domicílios de alto coeficiente de penetração eólico, produto entre a tarifa residencial vigente (R\$/kWh) e a densidade do recurso eólico (W/m²);
- Taxa de penetração entre 50% e 70% até 2035, e de 30% a 50% até 2050. Esse desenvolvimento é baseado no observado no mercado norte-americano para pequenas turbinas no período de 2003 a 2012, onde a compensação via *net metering* encontra-se presente (AWEA, 2011);
- A penetração no setor comercial foi considerada como 20% do observado no setor residencial;
- Para quantificação da geração do sistema eólico, foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas de pequeno porte disponíveis no mercado brasileiro,⁴⁵ adaptadas para ventos de 15 m, segundo manual dos fabricantes, quando disponível. Esse procedimento resultou em uma turbina de referência utilizada no cenário REF;
- Para sistemas em meio urbano, aplicou-se uma *penalidade energética* de 15% sobre o fator de capacidade da região.

Com o objetivo de simular que o consumidor não recupere parte da energia gerada em função do sistema de compensação de energia via *net metering* adotado no país, considerou-se uma potência máxima permitida para o sistema. Na parte superior da Tabela 72, encontra-se o consumo de energia anual médio por faixa de consumo, ao passo que a parte inferior (legenda) apresenta a capacidade máxima instalada para o respectivo nicho, orientada de acordo com a cor empregada. Por exemplo, a potência máxima permitida em domicílios da região Norte com consumo de energia na faixa 0-100 kWh é de 0,5 kW. O consumo médio desse grupo é de 667,14 kWh/ano.

Tabela 72 – Potência Máxima Permitida para Sistemas Eólicos de Pequeno Porte

Faixa do consumo de energia	Consumo médio por região				
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
0 a 100 kWh	667,14	651,91	1.257,94	1.357,8	1.522,41
100 a 200 kWh	1.098,72	1.554,34	1.484,8	1.957,1	2.271,06
200 a 300 kWh	1.626,95	2.269,7	2.356,98	2.943,45	3.443,84
Maior que 300 kWh	3.803,68	3.988,53	2.968,86	4.560,98	5.481,27

Legenda:

3,0 kW	
2,0 kW	
1,0 kW	
0,5 kW	

Fonte: Elaboração própria

⁴⁵ Contato direto, via e-mail, com as empresas: Enersud, Canoas Eólica, Windeo e Superwind.

4.5.1.2 RESULTADOS

A capacidade instalada de geração eólica no Brasil chega, em 2050, a 37,37 MW, com participação majoritária da região Sul do país (Figura 113). A geração de energia é 44,46 GWh em 2050.

A penetração da tecnologia se dá primeiro em locais onde a combinação de recurso eólico e tarifa de energia é mais vantajosa, a exemplo de domicílios nos estados do Pará, Piauí, Maranhão e Ceará.

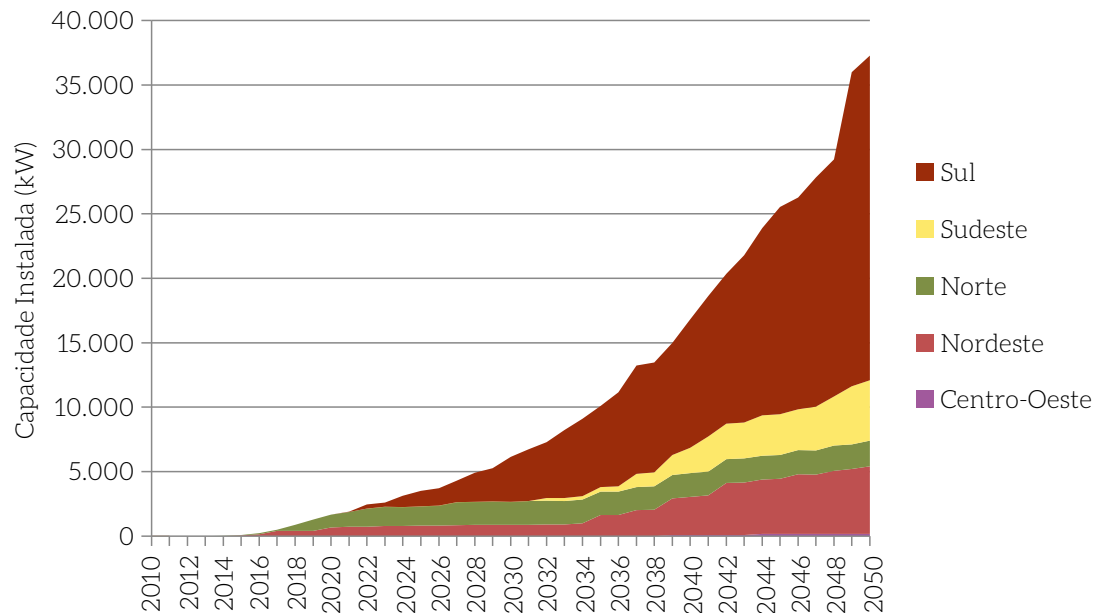


Figura 113 – Capacidade Instalada de Geração Distribuída Eólica no Cenário REF por Região (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A restrição de penetração da tecnologia que considera apenas domicílios com mais de 20 salários mínimos resultou em maior participação das regiões Norte e Nordeste nos primeiros anos do cenário REF, mas também em grande participação da região Sul ao fim do período. Por sua vez, as condições favoráveis de disponibilidade do recurso eólico no Norte e no Nordeste impulsionaram ambas as capacidades nos primeiros anos, porém a relativa pequena participação de domicílios de alto rendimento em ambas as regiões as levou a perderem o posto para a região Sul (Figura 114).

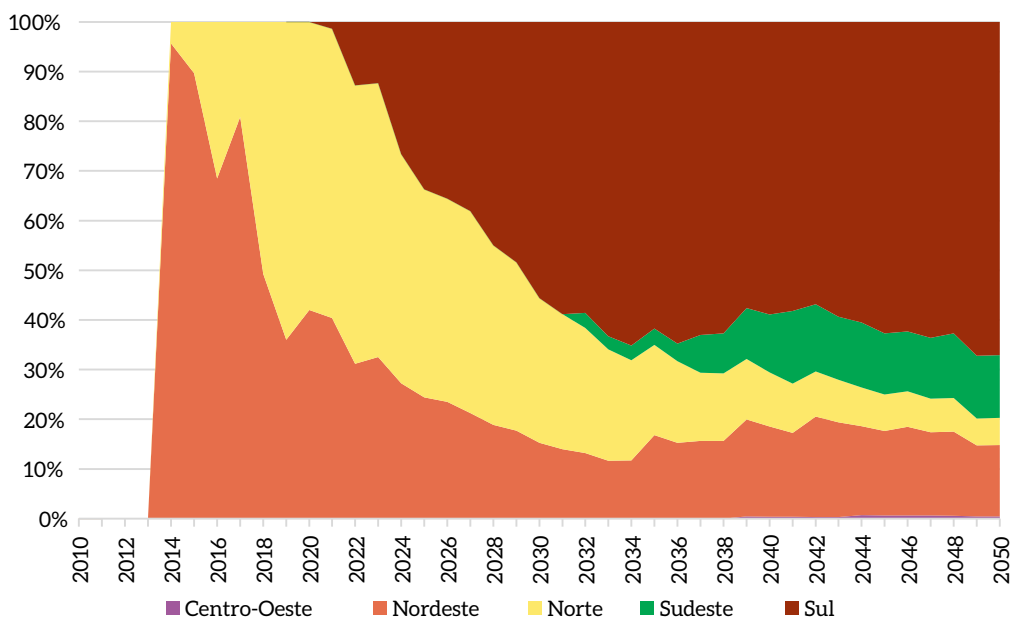


Figura 114 – Participação Percentual das Regiões na Capacidade Instalada de Geração Distribuída Eólica no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A restrição mínima de disponibilidade do recurso eólico permitiu a análise de penetração da tecnologia em 18 estados brasileiros, tendo cada uma ou mais regiões com diferente disponibilidade do recurso. Dentre as oito regiões de maior fator de capacidade (FC) no estudo, todas se encontram no Norte e no Nordeste, com destaque para o Rio Grande do Norte, com FC = 29,04% para uma altura de 15 metros do rotor. O FC médio do país foi de 16,75% (Figura 115).



Figura 115 – Fator de Capacidade Máximo (Max) e Mínimo (Min) para as Regiões Empregadas por Estado, em Ordem Crescente, com Base no Fator de Capacidade Máximo⁴⁶

Fonte: Elaboração própria

⁴⁶ Regiões empregadas pós-aplicação da restrição mínima de disponibilidade do recurso eólico. Estados onde apenas um único fator de capacidade foi empregado apresentam mesmos valores máximo e mínimo, ao passo que estados com região apta de grande extensão e variabilidade têm até cinco diferentes fatores de capacidade.

A maior penetração de regiões onde o recurso eólico é menos favorável faz que o rendimento médio dos sistemas seja decrescente ao longo do período de estudo à medida que a geração total de energia aumenta. A maior penetração de turbinas localizadas em meios urbanos contribui ainda mais para esse aspecto (Figura 116).

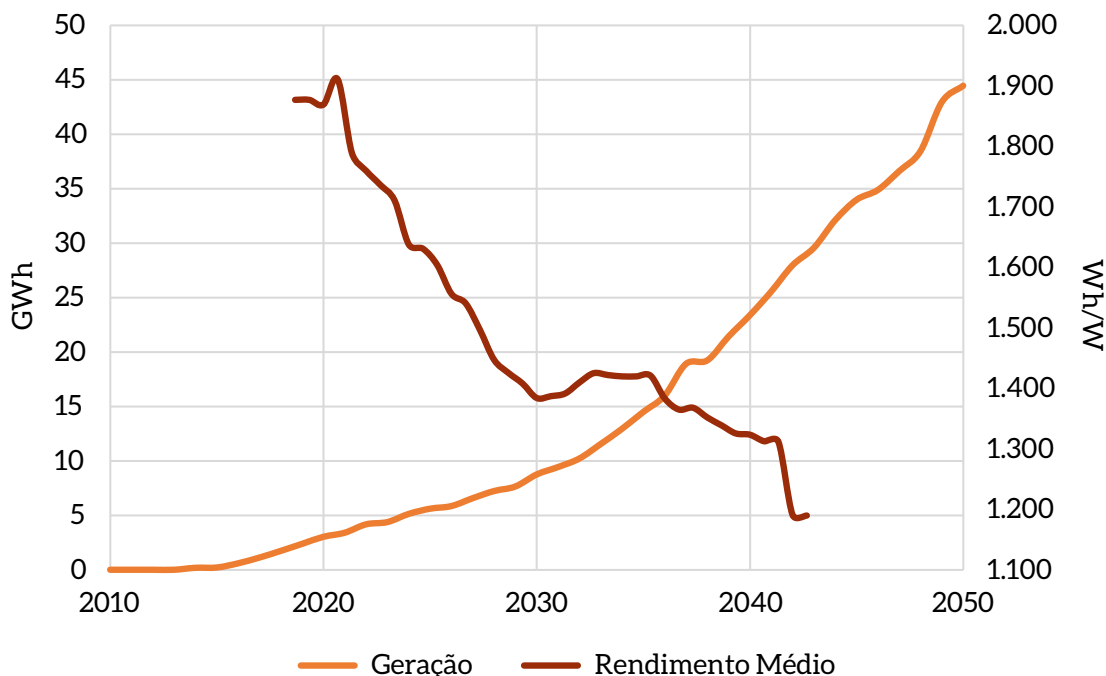


Figura 116 – Relação entre o Rendimento Médio de Sistemas e o Crescimento da Capacidade Instalada (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.5.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Diferentemente de grandes plantas centralizadas, a geração distribuída fotovoltaica está baseada na competitividade da tecnologia em face da tarifa de energia elétrica provida pelas concessionárias. Nesse sentido, um novo agente é incorporado à tomada de decisão, com custos de capital e características distintas às aplicadas no setor elétrico.

A construção do cenário REF para o setor foi feita por meio da viabilidade econômica de penetração da tecnologia na sociedade brasileira, sendo posteriormente aplicados coeficientes de redução de modo a modelar aspectos de escolha do consumidor. Uma vez *apto* à geração, o desempenho do sistema é função da localização e tipo do domicílio (urbano ou rural), como indicado pela Equação 20.

$$FV GD_t = \sum_{i,j,t} Residências_{ijt} * Geração_{i,j,t} \quad (20)$$

Onde,

i: regiões;

j: urbano/rural;

t: é o ano (2010, ..., 2050);

$Geração_{i,j,t}$: geração típica do sistema por localidade ou região (i), tipo de área (j) e ano (t).

4.5.2.1 PREMISSAS

Para a elaboração da penetração residencial, considerou-se a evolução de domicílios ao longo do horizonte do estudo, em meio urbano e rural, divididos por faixa de rendimento domiciliar e consumo de energia elétrica. Adicionalmente, a elaboração do cenário REF para a tecnologia partiu das seguintes premissas:

- Foram considerados dados de radiação solar de 20 cidades brasileiras. Assim, todo município é alocado ao dado solar disponível para a região geográfica mais próxima (Figura 117);⁴⁷
- Crescimento da tarifa residencial de 3% ao ano;
- Taxa de aprendizado de 18% até 2020 e de 16% até 2050 para módulos fotovoltaicos;
- Domicílios com rendimento superior a 20 salários mínimos;
- A penetração da tecnologia no setor comercial foi considerada com base na demanda de eletricidade estimada para esse setor. Assumiu-se que 0,7% seja suprido por sistemas FV até 2030, e 1% até 2050.

⁴⁷ Para mais informações acerca dos fatores de capacidade, ver Miranda et al. (2015).

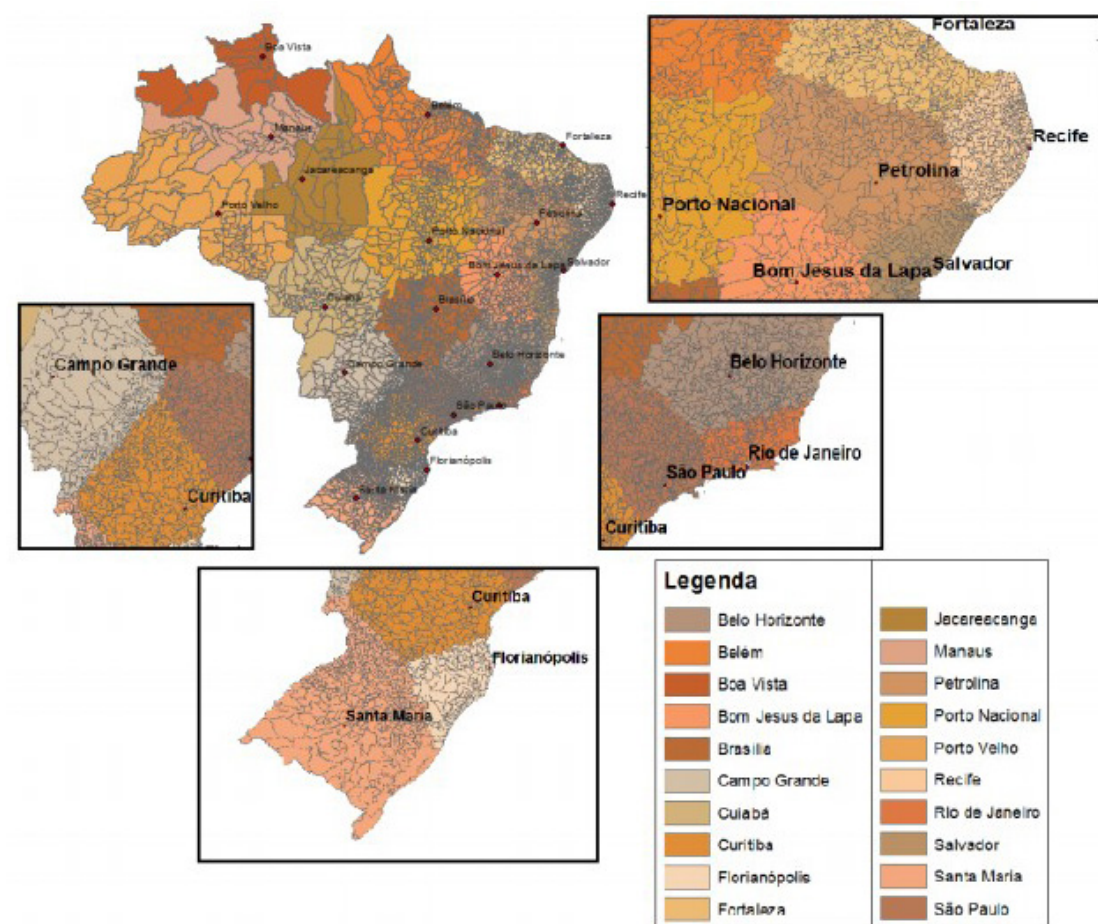


Figura 117 – Área de Abrangência no País para os 20 Dados de Radiação Solar Utilizados

Fonte: MIRANDA, 2013

A viabilidade econômica da tecnologia é quantificada analisando, ano a ano, a relação entre a tarifa de energia elétrica e o custo nivelado da tecnologia. Para esse fim, foram considerados os custos de investimento de operação e de capital da tecnologia, resultando no custo nivelado do sistema.

Com base nas taxas de aprendizado supracitadas, a estimativa de custos da tecnologia alcança, ao fim do horizonte de estudo, preço de R\$ 5,54/Wp⁴⁸ (Tabela 73).

Tabela 73 – Estimativa de Evolução dos Custos da Geração Distribuída Fotovoltaica

Preço (R\$/Wp)	2013	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	9,0	7,35	6,84	6,44	6,07	5,82	5,67	5,54

Fonte: MIRANDA, 2013

*Preço do sistema fotovoltaico completo instalado

48 Para mais informações acerca de cenários de evolução da indústria considerados, ver Miranda (2013).

O custo de oportunidade do consumidor foi considerado com base no rendimento potencial de aplicações disponíveis no mercado para esse agente, com base no ano de 2013 (BCB, 2013). Com a finalidade de diferenciar essas taxas entre as diferentes classes de renda, um ajuste foi feito sobre o valor encontrado, ponderado pela propensão marginal a consumir de cada estado (IBGE, 2008).

A escolha do consumidor em um ambiente de múltiplas opções é função de aspectos sociais, culturais, ambientais e de informação. Sendo assim, mesmo que a viabilidade econômica (paridade tarifária) de sistemas fotovoltaicos seja alcançada em domicílios brasileiros, acredita-se que a adesão à tecnologia aconteça mais tardiamente para alguns grupos ou mesmo que jamais venha a acontecer. Semelhantemente a Miranda (2013) e Miranda et al. (2015), considerou-se que, até 2030, apenas domicílios com viabilidade econômica e rendimento superior a dez salários mínimos vão aderir à tecnologia. Admite-se, ainda, que domicílios com rendimento domiciliar inferior a cinco salários mínimos jamais aderirão.

Por fim, para os domicílios que obtivessem viabilidade, adotou-se uma potência máxima permitida a ser instalada. Na parte superior da Tabela 74, encontra-se o consumo anual médio de cada faixa de consumo, ao passo que a parte inferior apresenta a capacidade máxima instalada para o respectivo nicho orientada de acordo com a cor empregada.

Tabela 74 – Consumo Anual Médio de Energia e Capacidade Fotovoltaica Permitida por Região do País

Faixa do consumo de energia	Consumo médio por região				
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
0 a 100 kWh	667,14	651,91	1.257,94	1.357,8	1.522,41
100 a 200 kWh	1.098,72	1.554,34	1.484,82	1.957,1	2.271,06
200 a 300 kWh	1.626,95	2.269,7	2.356,98	2.943,45	3.443,84
Maio que 300 kWh	3.803,68	3.988,53	2.968,86	4.560,98	5.481,27

Legenda:

2,2 kWp	
1,1 kWp	
0,5 kWp	

Fonte: Elaboração própria

4.5.2.2 RESULTADOS

Em 2050, a capacidade instalada no cenário REF é de 6,8 GWp (Figura 118). No início do horizonte de tempo analisado, a capacidade instalada da tecnologia PV é majoritariamente proveniente da região Nordeste, com destaque para o estado do Maranhão, com grande contribuição da alta tarifa de energia elétrica praticada no estado (Figura 119). A partir de 2020, a região Sudeste apresenta a maior capacidade instalada do país, fruto da grande densidade urbana da região e de seu alto poder aquisitivo, superior à média brasileira.

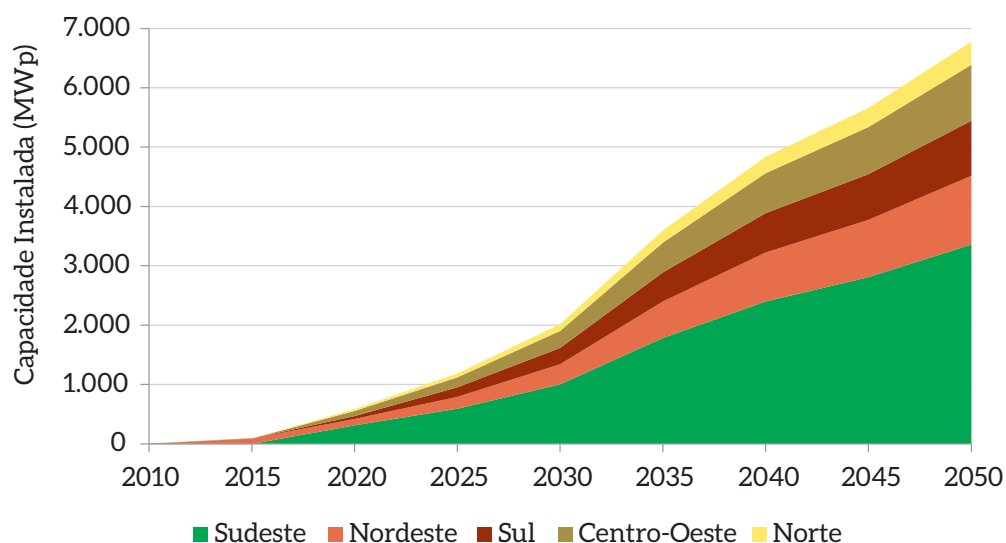


Figura 118 – Capacidade Instalada da Geração Distribuída Fotovoltaica por Regiões (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

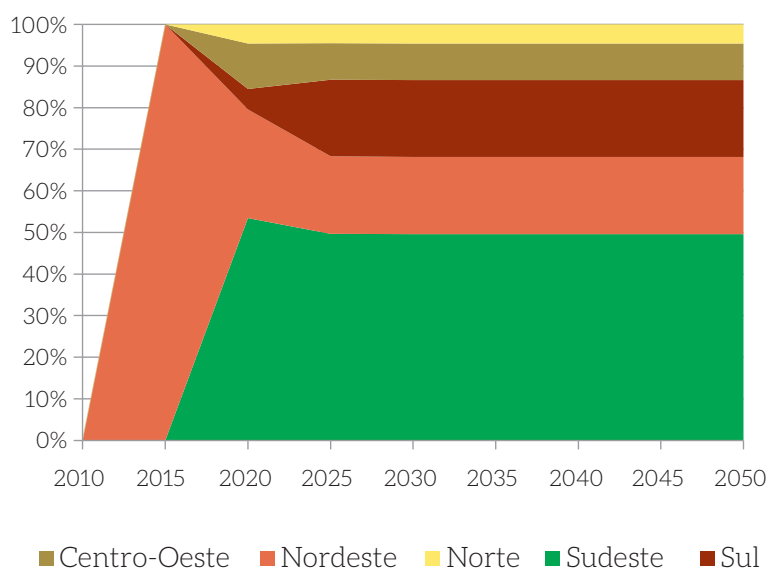


Figura 119 – Participação por Região na Capacidade Instalada da Geração Distribuída Fotovoltaica no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A região compreendida pelo dado solar de São Paulo apresenta a maior quantidade de sistemas em função da alta densidade populacional e renda da região. Pelo outro lado, o município de Bom Jesus da Lapa, Bahia – que tem uma das melhores disponibilidades de sol do país –, tem baixa penetração da tecnologia acoplada em edificações devido à baixa concentração urbana e alta concentração de domicílios de baixa renda domiciliar (Figura 120).

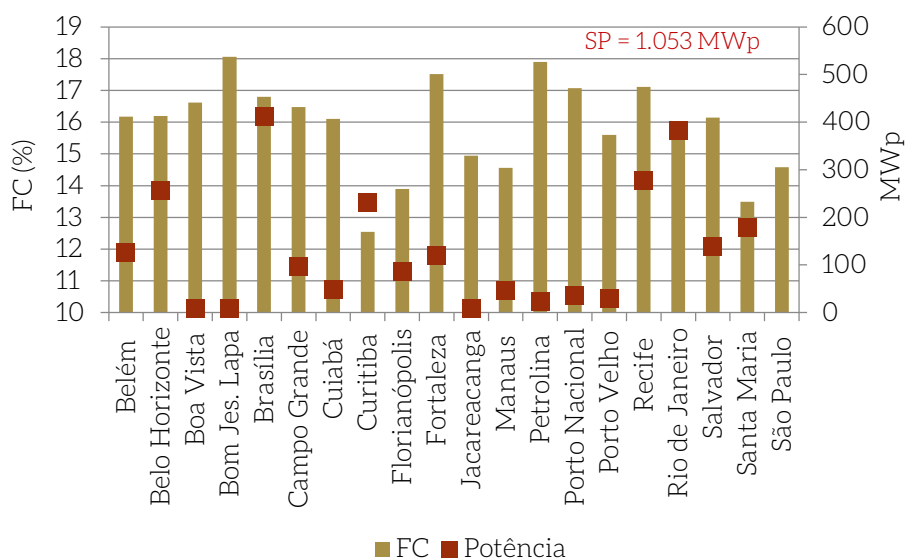


Figura 120 – Capacidade Instalada por Dado de Radiação Solar e Respetivo Fator de Capacidade (FC) por Municípios

Fonte: Elaboração própria

A evolução da capacidade instalada e geração de energia no cenário REF pode ser observada na Tabela 75.

Tabela 75 – Capacidade Instalada e Geração de Energia no Cenário REF (2015-2050)

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Capacidade Instalada (GWp)	0,09	0,58	1,19	2,01	3,59	4,84	5,66	6,78
Geração de Energia (TWh)	0,13	0,80	1,60	2,72	4,85	6,53	7,64	9,14

Fonte: Elaboração própria

4.6 RESULTADOS AGREGADOS

4.6.1 SETOR RESIDENCIAL

A Figura 121 consolida as projeções de consumo de energia, relativas ao cenário REF do setor residencial. Como se pode observar, o uso cocção é o que tem a maior participação relativa entre os usos finais. Isso se deve, conforme já mencionado, à participação da lenha, cuja eficiência de conversão em energia útil é muito baixa. Não obstante, para 2050, projeta-se queda na participação da cocção, abrindo espaço para os demais usos energéticos. Os “outros usos” ganham participação em 2050, quando comparados ao ano-base. Isso reflete, em grande medida, a penetração de aparelhos eletroeletrônicos em residências de menor renda, como computadores, televisões etc. Destaca-se também o aumento em climatização, que, embora ainda pequeno, demonstra ser significativo em relação ao ano-base.

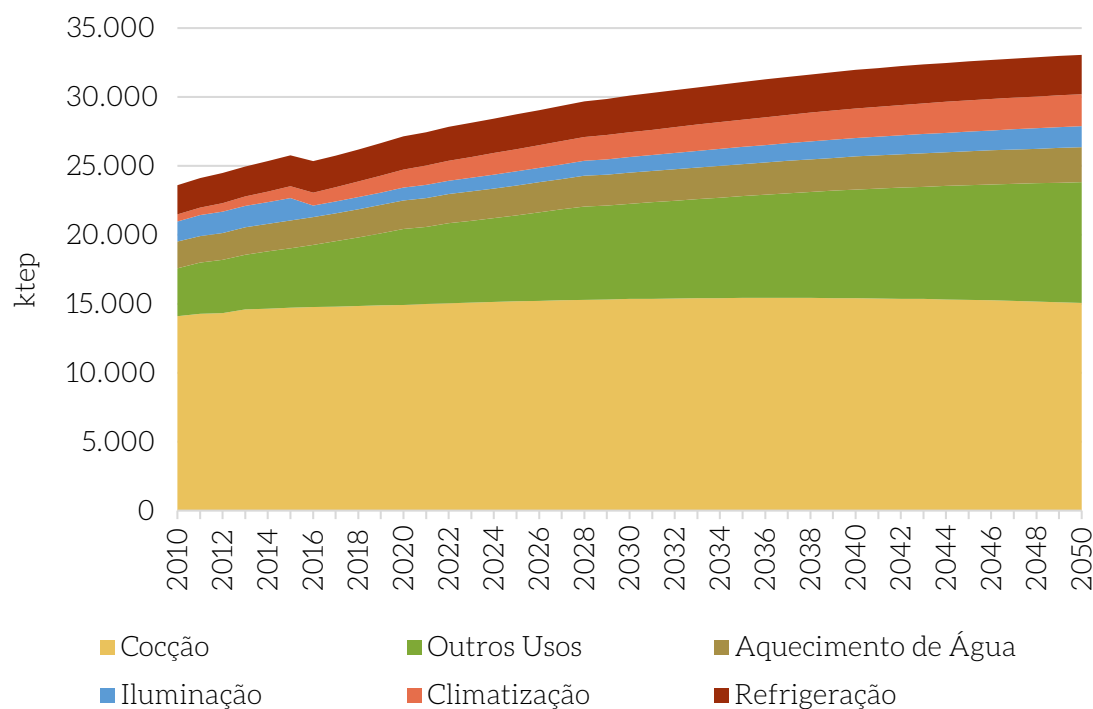


Figura 121 – Consumo Total de Energia por Uso Final do Setor Residencial no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.6.2 SETORES DE SERVIÇOS, COMERCIAL E PÚBLICO

A Figura 122 consolida as projeções do cenário REF para os setores comercial, serviços e público, incluindo a iluminação pública. O consumo energético relativo ao saneamento, por sua vez, é contabilizado junto ao setor de gestão de resíduos, avaliado separadamente pelo projeto.

Percebe-se que os usos iluminação (interior e pública), embora aumentem até 2050, apresentam queda em participação quando comparados aos demais usos. Por outro lado, os usos climatização, outros e aquecimento de água crescem em termos relativos até 2050.

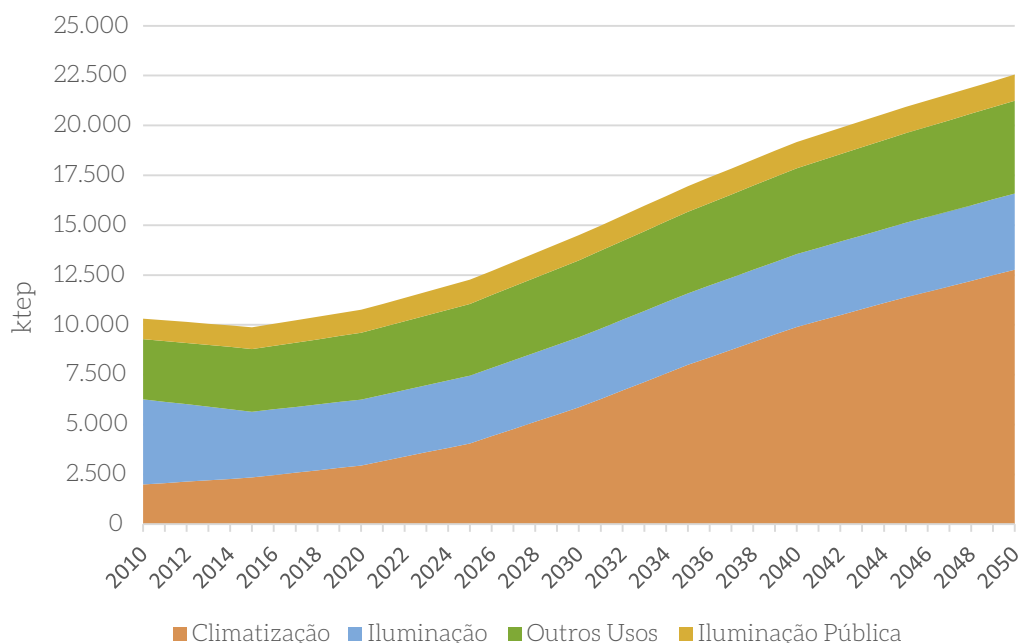


Figura 122 – Consumo Total de Energia por Uso Final nos Setores Comercial, Serviços e Público no cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

4.6.3 EMISSÕES DE CO₂

As projeções no consumo de energia implicam aumento nas emissões de GEE por parte dos setores de edificações. Destaque-se que a maior parte do consumo de energia no setor está relacionado à energia elétrica (cerca de 50%, em média, ao longo dos últimos dez anos – EPE, 2015a). Dessa forma, grande parte das emissões das edificações é indireta na medida em que ocorre, efetivamente, na queima de combustíveis fósseis para geração de eletricidade.

Cumpramos enfatizar que a análise realizada aqui é puramente setorial, motivo pelo qual atribuem-se ao setor de edificações as emissões correspondentes à eletricidade consumida. Todavia, as emissões do setor de edificações na modelagem integrada, que serão reportadas no âmbito do relatório “Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono”, serão atribuídas ao setor elétrico, metodologia que segue integralmente a TCN. Ademais, assumiu-se que o fator de emissão da lenha e do carvão vegetal no setor de edificações é nulo na medida em que essa contabilização deve ser reportada, semelhantemente à metodologia adotada pela TCN no caso da origem de floresta nativa, pelo setor de Afolu.

A Figura 123 apresenta a evolução das emissões de GEE do setor de edificações no cenário REF. Em face da representatividade das emissões de CO₂ perante o total (aproximadamente 99%), optou-se por desconsiderar emissões de metano, o que torna desnecessária a contabilização em termos de dióxido de carbono equivalente.

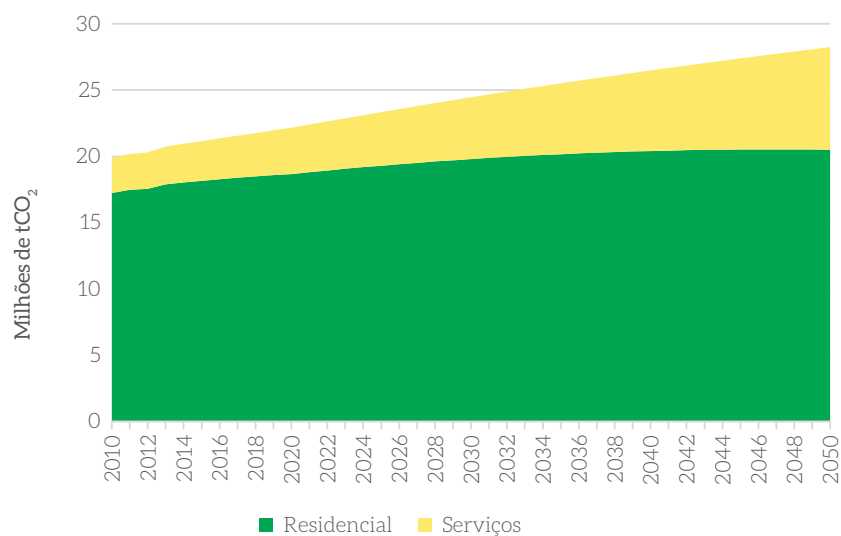


Figura 123 – Emissões de CO₂ no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Observa-se relativa estabilização das emissões do setor residencial que ocorrem principalmente em função da substituição do GLP por gás natural, cujo fator de emissão é menor. Os setores comercial, de serviços e público, por sua vez, apresentam aumento no consumo tanto de GLP quanto de gás natural até 2050, o que leva a aumento nas emissões desses setores no cenário REF.



Cenário de baixo carbono

Capítulo

5

5 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

O cenário BC considera a adoção das MTD, descritas no capítulo 2, pelos setores residencial, comercial e serviços e público. Com essas medidas – que serão detalhadas adiante –, é possível calcular o potencial de emissões abatidas de CO₂ e consequentemente seu custo marginal de abatimento.

Neste capítulo, será feita, primeiramente, uma breve contextualização sobre o tema (seção 5.1). Na seção 5.2, será demonstrada a metodologia utilizada para o cálculo do custo marginal de abatimento. Na seção 5.3, serão apresentadas as premissas gerais do cenário BC. Nas seções 5.4, 5.5 e 5.6, apresentar-se-ão premissas e resultados específicos dos setores analisados e para a geração distribuída. Por fim, na seção 5.7, apresentam-se os resultados agregados.

5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O processo de decisão para a adoção de medidas de mitigação no setor de edificações é diferente dos demais setores da economia em função de diversas barreiras de mercado específicas desse setor. Além de ser um setor muito heterogêneo, há grandes barreiras à penetração de medidas de abatimento no setor de edificações, como:

- Fragmentação do setor em um número grande de pequenos agentes;
- Informação imperfeita;
- Custos de transação;
- Altas taxas de desconto;
- Falta de acesso a financiamento;
- Subsídios energéticos;
- Problema agente-principal;
- *Lock-in* tecnológico;
- Etc.

Ademais, deve-se ter em conta que o setor de edificações consiste, por um lado, de agentes produtivos (firmas) que agem segundo uma racionalidade econômica de maximização do lucro. Entre esses segmentos, estão os setores comercial e de serviços. Esses setores percebem as medidas de mitigação como possíveis investimentos rentáveis, na medida em que estão relacionados à redução de gastos com energia.

É de se esperar, portanto, que, em um mercado com informação perfeita e agentes racionais, medidas que trazem fluxo de caixa positivo a uma dada taxa de desconto (supondo esta como equivalente ao custo de oportunidade do capital naquele setor) deverão ser adotadas. Nesse caso, políticas de precificação de carbono que gerem aumento do custo com energia podem aumentar a atratividade de tais medidas. Entretanto, conforme discutido acima, há diversas barreiras de mercado que impedem que isso ocorra de forma ótima. De fato, estudos indicam que preços de carbono precisam ser muito altos e mantidos por longo tempo para surtirem efeitos em edificações (LUCON et al., 2014).

No caso do setor residencial – diferentemente de um setor produtivo, em que investimentos objetivam retorno financeiro e o custo de oportunidade do capital é dado pelos investimentos alternativos aos quais determinado agente tem acesso –, muitas vezes, o custo de oportunidade são possibilidades de consumo no presente. Assim, um investimento em eficiência energética pode competir, por exemplo, com uma viagem de férias ou um carro novo, e não com o retorno desse montante em uma aplicação financeira. Percebe-se, portanto, que, enquanto o custo de oportunidade do capital em um setor produtivo passa pela função de lucro, nas famílias, passa pela função utilidade, ou pelas preferências, cuja estimação é fundamentalmente mais complexa e incerta.

Ademais, há grande dificuldade de se estimar uma taxa de desconto para investimentos em eficiência energética no setor residencial, aspecto avaliado na seção 5.3.3.1. Por um lado, o setor residencial, ou as famílias, é bastante diverso, sendo difícil encontrar um valor que seja representativo para a sociedade. Por outro lado, a preferência pelo presente no setor residencial não necessariamente deve ser medida em função do custo de oportunidade em termos de investimentos alternativos, mas sim consumo.

No caso do setor público, há um grande entrave associado ao problema do agente-principal. Isto é, o agente que consome energia não é aquele que paga pelo seu custo, ou inibe o incentivo de preços ao agente consumidor. Investimentos em eficiência energética no setor público, portanto, necessariamente passam pelo planejamento e pela administração do setor.

5.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Esta seção apresenta a abordagem metodológica geral para cálculo de custo de abatimento no setor de edificações, considerando uma ótica puramente setorial.

Deve-se enfatizar que a análise setorial das opções de mitigação de emissões do setor é relevante, sobretudo, para elencar as opções de baixo carbono e os instrumentos de política pública que deveriam ser considerados para a sua implementação. Mais do que isso, a avaliação setorial é relevante para a obtenção dos parâmetros técnico-econômicos que viabilizam a construção dos cenários integrados de emissões de GEE. Nesse sentido, os potenciais e custos de abatimento devem ser avaliados à luz dos resultados da modelagem integrada, a qual permite avaliar efeitos de não aditividade das medidas de baixo carbono. Esse é o caso, por exemplo, da substituição dos fogões a GLP por gás natural. Na avaliação setorial, essa opção poderia apresentar potencial significativo de redução das emissões pelo setor, sem, contudo, indicar, adequadamente, a competição pelo insumo energético com outros setores. Por esse motivo, é comum que a avaliação setorial apresente potenciais e custos de mitigação de

emissões de GEE super e subestimados, respectivamente. Os aspectos anteriormente mencionados, portanto, indicam os objetivos da análise setorial e integrada do projeto acerca das oportunidades de transição do país para uma economia de baixo carbono.

No setor de edificações, as opções de mitigação também devem considerar o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD). O GLD compreende dois tipos principais de medidas: eficiência energética e gerenciamento da curva de carga. A primeira medida diz respeito à redução no consumo de energia sem que se perca quantidade/qualidade do serviço energético, vindo de equipamentos mais eficientes, ou até mesmo mudanças estruturais e/ou mudanças comportamentais. A segunda refere-se ao deslocamento da demanda entre horários, em geral transferindo demanda elétrica dos horários de pico para horários de baixa demanda. Embora ambas as medidas sejam elementos importantes do planejamento, visto que reduzem a necessidade de expansão na capacidade de produção de energia, reduzindo investimentos e mitigando impactos ambientais, consideram-se apenas opções de eficiência energética, excluindo gerenciamento de carga.

Outra opção de mitigação importante considerada aqui é a geração distribuída de eletricidade. Na medida em que a geração distribuída renovável (solar fotovoltaica, principalmente) desloca geração elétrica do *grid*, pode reduzir as emissões de GEE do consumo de eletricidade. A metodologia para a parte de geração distribuída será descrita na seção 5.6.

Para avaliar os efeitos de políticas energéticas no setor de edificações – seja pela geração distribuída, seja pela GLD –, fez-se uso de uma metodologia técnico-paramétrica que considera diferentes opções tecnológicas para mitigação de GEE, elencadas como MTD no capítulo 2 deste relatório. Os modelos técnico-paramétricos ou contábeis de uso final fazem uma descrição detalhada do sistema energético, ou seja, detalham a estrutura tecnológica e o uso final da energia. Essa classe de modelos é mais flexível para a avaliação de alternativas tecnológicas, além de permitir avaliar o efeito de mudanças estruturais (como é o caso de medidas de baixo carbono).

Portanto, fez-se uso da metodologia *bottom-up*, já descrita no capítulo 3, para avaliação da penetração das MTD de baixo carbono no setor de edificações brasileiro, no que diz respeito aos principais usos finais no setor. Nesse arcabouço metodológico, é possível avaliar as seguintes opções de mitigação:

- Ganhos de eficiência energética pela troca de equipamentos;
- Troca de combustíveis;
- Geração distribuída.

Para efeito das análises e projeções que são objeto deste estudo, 2010 é o ano-base. Entretanto, pressupõe-se que a penetração das tecnologias de baixo carbono ocorre a partir de 2015.

Neste trabalho, o foco principal são as medidas de eficiência energética oriundas da troca de equipamentos por MTD. Embora a troca de combustíveis seja uma importante possibilidade de mitigação, entende-se aqui que a escolha muitas vezes não passa pelo agente individual, pois depende da evolução do setor energético e da infraestrutura de transporte de energia futura. Por exemplo, a

mudança de GLP para gás natural em residências não é uma escolha do morador, pois depende do acesso a esse combustível e, portanto, da expansão da rede de distribuição.

Uma vez que a modelagem integrada do projeto é que define a expansão das fontes e, consequentemente, do acesso a elas, optou-se por manter fixa a participação das diferentes fontes. A única exceção é a penetração de aquecimento solar deslocando chuveiros elétricos no setor residencial.

Modelos *bottom-up* também permitem avaliar ganhos de eficiência energética pela mudança nos hábitos de consumo. Entretanto, tais medidas são modeladas a partir de definições feitas pelo analista acerca do comportamento dos agentes. O modelo restringe-se a avaliar medidas *what if*, simulando os resultados de medidas comportamentais definidas pelo analista. Entretanto, há grande variedade de possibilidades de mudanças comportamentais, e os custos e potenciais de tais medidas são de difícil quantificação. Da mesma forma, tais medidas são menos sensíveis a políticas públicas. Dessa forma, optou-se por excluí-las da análise.

Finalmente, é importante ressaltar que as demandas por serviços energéticos são iguais nos cenários REF e BC, mudando apenas as tecnologias de uso final que estão disponíveis para atender essas demandas. Em outras palavras, as MTD não reduzem a quantidade de serviço energético (como iluminação, cocção etc.), apenas reduzem a quantidade de energia final necessária para prover o mesmo serviço.

5.2.1 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DO POTENCIAL E CUSTO DAS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

O procedimento aqui adotado faz uso do arcabouço *bottom-up* para calcular custos e potenciais de abatimento de emissões de GEE no setor de edificações para cada uso final e para geração distribuída. De forma geral, o procedimento segue seis etapas:

- 1) Definição do período de análise e da linha de base;
- 2) Levantamento das opções de baixo carbono (MTD) e seus custos;
- 3) Identificação do potencial de penetração das opções de baixo carbono;
- 4) Cálculo dos custos de abatimento das opções de baixo carbono em relação às tecnologias do cenário REF;
- 5) Cálculo do potencial de abatimento com base na penetração de tecnologias de baixo carbono em face da linha de base;
- 6) Cálculo do custo de abatimento por unidade de CO₂e abatida (US\$/tCO₂e).

A seguir, cada uma dessas etapas é descrita de forma genérica. Nas seções 5.4 e 5.6, tais etapas são detalhadas para cada uso final e para geração distribuída:

- Etapa 1: o período relevante para o cenário BC é de 2015 a 2050. Embora o ano-base seja 2010, entende-se que medidas de mitigação somente podem ser adotadas a partir de 2015. A linha de base utilizada foi descrita no cenário REF.
- Etapa 2: as opções de mitigação dadas pelas MTD para o setor foram elencadas no capítulo 2.

- Etapa 3: a penetração das tecnologias de baixo carbono é específica para cada uso final. De forma geral, adotou-se a premissa de que as tecnologias somente seriam substituídas ao final de sua vida útil.
- Etapa 4: o custo de abatimento é custo incorrido para mitigar cada unidade de CO₂e. O cálculo do custo de abatimento das opções de baixo carbono é feito em relação às tecnologias de linha de base, usando uma análise financeira. Dividem-se, neste relatório, os custos entre custos de capital (Capex) e de operação (Opex). Assim, como os valores de custos (e/ou receitas) das opções de mitigação se dão ao longo do tempo, é necessário trazê-los a valor presente. Algumas medidas incorrem em custos menores ou mesmo receitas. Por exemplo, uma medida que economize energia reduz gastos com combustíveis, além de reduzir emissões. Dessa forma, medidas de baixo carbono, apesar de um Capex maior, têm valores de Opex mais baixos por conta de custos evitados de energia.
- Etapa 5: o potencial de abatimento vai depender da taxa de penetração adotada (etapa 3) e será dado pela diferença entre as emissões considerando as opções de mitigação (cenário BC) e a linha de base (cenário REF). De forma geral, adotou-se como premissa que o potencial de abatimento será máximo, restrito apenas à penetração de novos equipamentos conforme a substituição ao final da vida útil.
- Etapa 6: a partir dos resultados das etapas 4 e 5, obtêm-se os custos de abatimento por unidade abatida (US\$/tCO₂e), conforme mostra a Equação 21.

$$CO_2e = \frac{C_k - C_{ref}}{E_{CO_2ref} - E_{CO_2k}} \quad (21)$$

Onde:

CO₂e: custo de abatimento de CO₂e (US\$/tCO₂e);

C_k: valor presente do custo da medida de mitigação k no cenário BC (US\$);

C_{ref}: valor presente do custo no cenário REF (US\$);

E_{CO₂ref}: quantidade de CO₂e emitida no cenário REF;

E_{CO₂k}: quantidade de CO₂e emitida considerando a medida de mitigação no cenário BC.

Caso o valor presente dos custos da opção de abatimento seja menor que da linha de base, dada uma taxa de desconto, custos de abatimentos serão negativos. Quando o valor desse custo é negativo, significa que, além de reduzir emissões de CO₂e, a medida envolve economia de recursos. Ou, em outras palavras, a medida é viável sob o ponto de vista técnico e econômico.

A seguir, são apresentadas as premissas gerais consideradas no cenário BC. Em seguida, a metodologia e os resultados específicos para cada uso final e para geração distribuída serão apresentados.

5.3 PREMISSAS GERAIS

5.3.1 PREÇO DA ENERGIA

Na medida em que grande parte das opções de abatimento envolve a adoção de medidas de eficiência energética, o preço da energia é uma variável crucial na estimativa do custo de abatimento.

Uma medida de eficiência energética leva a custos evitados de energia que vão depender do preço pago por ela. Como o custo de abatimento é contabilizado em relação a uma linha de base, o preço da energia o afeta diretamente.

O setor de edificações é um setor de consumo final, por isso utilizou-se como valor da energia o preço pago por categoria de consumidor e região em 2010, segundo a Tabela 76.

Tabela 76 – Preço da Energia por Fonte, Setor e Região para Cálculo do Custo de Abatimento (valores em US\$/MWh)

	Eletricidade			Gás Natural		GLP	
	Residencial	Comercial	Público	Residencial	Comercial/ Público	Residencial	Comercial/ Público
Sudeste	197,0	178,8	105,1	183,8	89,9	103,3	129,2
Sul	191,7	180,4	100,2	137,9	89,9	106,3	129,2
Centro-Oeste	188,9	181,4	104,3	128,7	89,9	117,4	129,2
Norte	177,8	190,7	97,2	128,7	89,9	106,5	129,2
Nordeste	182,8	200,9	106,5	128,7	89,9	100,0	129,2

Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL, 2014

Trata-se de valores pagos pelos consumidores de diferentes categorias, considerando tarifas e encargos. Optou-se por manter os preços reais de 2010 até 2050 por simplificação. É de se esperar que o preço da energia aumente com a inflação, porém, como este estudo trabalha com dólares constantes de 2010 e taxas de desconto reais, não se fazem necessárias alterações nos preços.

5.3.2 FATOR DE EMISSÃO DO GRID

A eletricidade é a principal fonte de energia final consumida no setor de edificações. Em média, nos últimos dez anos, a eletricidade correspondeu a cerca de 50% do consumo de energia final no setor de edificações (EPE, 2016). Grande parte das emissões de GEE nesse setor é, portanto, indireta, uma vez que ocorre na geração elétrica e não na edificação em si. Dessa forma, faz-se necessário trabalhar com um fator de emissão para energia elétrica que reflita a quantidade de CO₂ emitida para gerar a eletricidade consumida no setor. Esse fator, por sua vez, não é estático, uma vez que a operação do setor elétrico brasileiro faz uso de mais ou menos combustíveis fósseis em função da hidrologia do período. Ademais, na medida em que se avança no tempo, novas tecnologias de geração elétrica serão adotadas na expansão do setor. Enquanto o primeiro problema não pode ser resolvido integralmente, dado que não se sabe ao certo o regime de vazões futuro (devendo-se, portanto, trabalhar com valores médios), no segundo, pode-se fazer uso de cenários.

Utilizaram-se os fatores de emissão do *grid* elétrico projetado na linha de base pela modelagem integrada realizada no projeto, usando-se o modelo MSB8000. Cabe uma ressalva, inerente à análise por uma ótica setorial pura: o fator de emissão do *grid* depende da evolução da demanda futura de eletricidade, o que gera uma circularidade de resultados. Esse problema, entretanto, é somente resolvido na modelagem integrada, não sendo tratado neste produto setorial.

A Figura 124 apresenta os fatores de emissão do *grid* utilizados neste relatório. Ressalta-se que foi aplicado desconto de 10% aos fatores de emissão em função das perdas médias⁴⁹ de transmissão e distribuição.

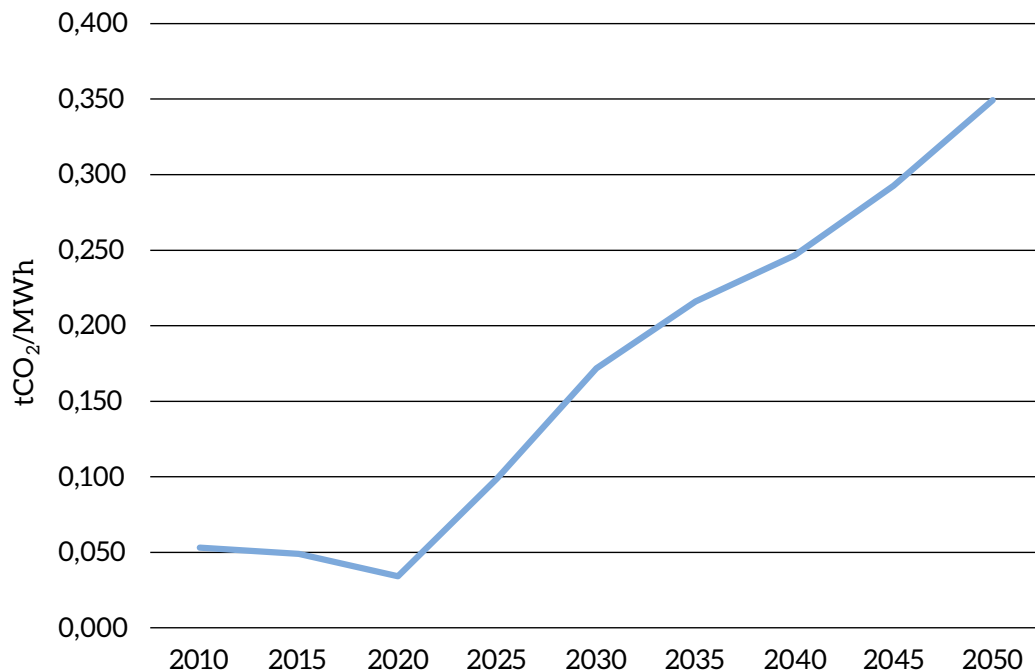


Figura 124 – Fator de Emissão da Geração Elétrica (2010 a 2050)

Fonte: Elaboração própria

5.3.3 TAXA DE DESCONTO

A definição da taxa de desconto é crucial em uma análise de medidas de abatimento de emissões de GEE. De forma geral, tais medidas implicam investimentos correntes e retornos (ou custos) futuros, que devem ser trazidos a valor presente para fins de comparação.

A taxa de desconto reflete a preferência pelo presente dos agentes econômicos, sendo que diferentes segmentos (ou mesmo agentes individuais) têm medidas de preferência intertemporal diferentes. Dessa forma, foram utilizados critérios diferentes para definir as taxas de desconto representativas de cada setor, conforme apresentado a seguir.

⁴⁹ Esse valor é oriundo das rodadas de modelagem integrada.

5.3.3.1 SETOR RESIDENCIAL

É importante destacar a dificuldade de estimar uma taxa de desconto para investimentos em eficiência energética no setor residencial. O setor residencial é bastante diverso, sendo difícil encontrar um valor que seja representativo para todas as famílias que compõem a sociedade brasileira.

O custo de oportunidade pode ser expresso por possibilidades de consumo no presente, o que o distingue de um setor produtivo, em que o custo de oportunidade do capital é dado pelo retorno financeiro das alternativas de investimento a que os agentes têm acesso. Assim, no caso do setor residencial, a opção por investimentos em eficiência energética concorre com opções de consumo, e não com o retorno em aplicações financeiras. Portanto, a estimação do custo de oportunidade do capital do setor residencial é complexa e incerta, pois está relacionada à função utilidade, isto é, às preferências dos consumidores.

Contudo, não é razoável afirmar que todas as famílias têm o mesmo custo de oportunidade. Diferenças entre a dotação de capital inicial das famílias podem levar a estimativas enviesadas do custo de oportunidade. Ademais, domicílios com maior rendimento têm acesso a opções de investimento mais atrativas, razão pela qual esperam maior retorno sobre seu capital. Da mesma forma, é razoável considerar que classes de rendimento mais baixas têm maior preferência pelo presente, em função de sua maior restrição orçamentária e aversão ao risco.

Diante dessas limitações, a taxa de desconto do setor residencial para investimentos em eficiência energética foi estimada a partir da série histórica de aplicações financeiras de médio/longo prazo, empréstimos de curto prazo (cheque especial) e de linhas de crédito destinadas à construção civil, conforme a Tabela 77.

Tabela 77 – Média Geométrica dos Índices de Curto, Médio e Longo Prazo para Cálculo da Taxa de Desconto do Setor Residencial (% a.a.)

Empréstimo de Curto Prazo	% a.a.	Empréstimo para Construção Civil	% a.a.	Investimento de Médio Prazo	% a.a.	Investimento de Longo Prazo	% a.a.
Banco Nordeste	43,0	BB Construção (CP)	39,6	Selic	11,6	BB Renda Fixa LP 100	7,5
Banco Fator	66,3	BB Construção (LP)	47,8	CDI (1)	11,5	BB RF LP 50 mil	10,9
Banco Brasília	99,7	Caixa Construcard	24,6	CDB (2)	10,4	BB RF LP Ind 5 Mil	12,1
Banco Amazônia	104,5	Bradesco SAS	41,4	Poupança (1)	7,1	BB RF LP Corp 10 MM	11,9
Caixa Econômica	186,6			Poupança (2)	7,3	BB RF LP Corp 600M	11,4
Banco do Brasil	200,6			Ibovespa	3,0	BB RF LP 90 mil	11,1

Empréstimo de Curto Prazo	% a.a.	Empréstimo para Construção Civil	% a.a.	Investimento de Médio Prazo	% a.a.	Investimento de Longo Prazo	% a.a.
Bradesco	235,0			Dólar Com.	42,2	BB Renda Fixa LP 500	9,7
				Ouro	34,6	BB RF LP Corp 3 MM	11,6
				IPCA	8,3		
Média Geométrica	114,7	37,3		11,1		10,7	

Fonte: Elaboração própria a partir de VALOR ECONÔMICO, 2015; BB, 2015; BCB, 2008; BCB, 2015; BNDES, 2005

Portanto, para estabelecer uma única taxa de desconto para todo o setor residencial, foi necessário estimar uma carteira representativa do tomador do financiamento. A propensão marginal a consumir de curto, médio e longo prazo das famílias (IBGE, 2008) (Tabela 78) foi adotada como critério para ponderação dessa carteira.

Tabela 78 – Cálculo da Taxa de Desconto do Setor Residencial (% a.a.)

Indicador	Índice (% a.a.)	Propensão Marginal a Consumir – PMgC (%)	Taxa de desconto (% a.a.)
Empréstimo de curto prazo	114,7	50	57,4
Empréstimo para construção civil	37,3	10	3,7
Investimento de médio prazo	11,1	20	2,2
Investimento de longo prazo	10,7	20	2,1
Total	-	100	65,4

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE, 2008

A taxa de desconto foi obtida por meio da média ponderada dos quatro índices (Tabela 77) pelos valores da carteira, conforme a Tabela 78, sendo de 65,4% ao ano. Esse valor reflete o potencial de mercado (taxa de desconto de mercado). Porém, no caso do setor residencial, há significativa diferença em relação ao potencial econômico que deve ser incorporado. Para tanto, assumiu-se que o potencial econômico representa 45% do potencial de mercado. Considerando esse diferencial, bem como taxa de inflação de 4,5% a.a. (BCB, 2008), o valor da taxa real de desconto adotado para o setor residencial é de 23,8% a.a. (taxa de desconto econômica).

Como o valor de taxa de desconto considerado para o setor residencial já é demasiadamente alto, optou-se por não fazer uma análise de sensibilidade para taxas de mercado, ainda mais altas. Os resultados com uma taxa que incorpora eventuais barreiras de mercado tornariam qualquer medida de mitigação inviável dado o alto desconto no tempo.

5.3.3.2 SETOR COMERCIAL E SERVIÇOS

Para o cálculo da taxa de desconto do setor comercial e serviços, adotou-se como referência a linha de financiamento Proesco,⁵⁰ oferecida pelo BNDES, que tem por objetivo apoiar projetos de eficiência energética. O custo de capital, entendido como a taxa de juros do financiamento tomado, é expresso pela Equação 22.

$$\text{Taxa de juros} = \text{custo financeiro} + \text{remuneração do BNDES} + \text{taxa de risco de crédito} \quad (22)$$

Sendo o custo financeiro mínimo igual à taxa de juros de longo prazo (TJLP); a remuneração mínima do BNDES igual a 1,20% a.a. (médias e grandes empresas) e 1,50% a.a. (pequenas empresas); e a taxa máxima de risco de crédito de 4,18% a.a. para o setor privado.

O valor da TJLP, para o ano 2010, foi de 6,00% a.a. (BNDES, 2011). Para as demais taxas, foram adotados os valores máximos como referência. Com isso, a taxa de juros cobrada pelo Proesco seria de (Equação 23):

$$\text{Taxa de juros} = 6,00\% + 1,50\% + 4,18\% = 11,65\% \text{ a.a.} \quad (23)$$

O cálculo acima se refere a operações diretamente com o BNDES. Se realizadas por meio de outro agente financeiro, devem ser acrescidos ao cálculo os prêmios e a remuneração a essas instituições. Os valores também são definidos pelo BNDES, como: i) taxa de intermediação financeira igual a 0,1% (pequenas empresas) ou 0,5% a.a. (médias e grandes empresas); ii) remuneração máxima da instituição credenciada igual a 4,0% a.a.

Da mesma forma, para a taxa de intermediação financeira e remuneração da instituição credenciada, foram consideradas as maiores taxas. Assim, a taxa de desconto adotada para o setor comercial/serviços resultaria igual à Equação 24.

$$\text{Taxa de Desconto} = 11,65\% + 0,50\% + 4,00\% = 16,15\% \text{ a.a.} \quad (24)$$

Vale notar que esse valor reflete o potencial de mercado. No entanto, no caso do setor comercial/serviço, há uma diferença em relação ao potencial econômico que deve ser incorporada. Para tanto, assumiu-se que o potencial de mercado representa 90% do potencial de econômico. Considerando esse diferencial, bem como taxa de inflação de 4,5% a.a. (BCB, 2008), o valor da taxa real de desconto para o setor comercial/serviços é de 9,60% a.a.

50 Adotar essa linha de financiamento como referência é conveniente porque ela pode ser solicitada por diferentes agentes (Empresas de Serviços de Conservação de Energia – Escos –, usuários finais de energia e empresas de geração, transmissão e distribuição de energia) e pode financiar empreendimentos, como plantas de cogeração e geração distribuída, bem como intervenções localizadas que contribuam para economia de energia, aumento da eficiência ou promovam a substituição de combustíveis fósseis. Além disso, a Proesco financia estudos, projetos, serviços técnicos, equipamentos para uso final e não exige valor mínimo para o financiamento.

5.3.3.3 SETOR PÚBLICO

Para o setor público, seria difícil considerar diferenças entre o potencial econômico e o potencial de mercado. Caso fossem consideradas, essas diferenças estariam expressas por custos de transação. Por sua vez, a mensuração desses custos de transação, para o setor público, dificultaria sobremaneira a estimativa de uma taxa de desconto.

Assim, adotaram-se como referência para o cálculo da taxa de desconto do setor público os critérios de indexação da dívida de estados e municípios junto ao governo federal. Tais critérios estão expressos na Lei Complementar nº 148, de 25 de novembro de 2014. O texto estabelece um índice de correção da dívida pública igual a 4,00% a.a. acrescido da variação do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), com limite definido pela taxa do Serviço de Liquidação e Custódia do Banco Central do Brasil (taxa Selic).

A taxa de desconto real do setor público foi, em cálculo simplificado, definida em 4,0% a.a., considerando o valor mínimo do critério de indexação da dívida pública.

5.4 PREMISSAS E RESULTADOS DO SETOR RESIDENCIAL

A seguir, apresentam-se premissas e resultados específicos para cada uso final no cenário BC.

5.4.1 ILUMINAÇÃO

5.4.1.1 PREMISSAS

As projeções do cenário BC relacionadas ao consumo de energia e emissões associados a iluminação no setor residencial tomam por base o serviço energético. O consumo de energia foi calibrado pela Equação 1, já demonstrada.

A partir de parâmetros econômicos, são calculados os valores em base anual para os custos com energia e de reposição do parque de iluminação, este tendo por base vidas médias ajustadas por tecnologia – ou seja, a expectativa de vida mediana dividida pelo número de horas de uso em residências. A Tabela 79 mostra a vida útil considerada para cada tecnologia.

Tabela 79 – Vida Útil Considerada para as Tecnologias de Iluminação no Setor Residencial

Tecnologia	Vida Útil (anos)
FT (fluorescente tubular)	6
FC (fluorescente compacta)	4
INC (incandescente)	1
LED	20

Fonte: Elaboração própria a partir de DOE, 2014b

Sendo os parâmetros tecnológicos (desempenho luminoso, rendimento de conversão e vida média) considerados iguais para os dois cenários (REF e BC), a diferença entre eles deve-se a diferentes taxas de penetração, diretamente relacionadas à posse das tecnologias.

Para os dados de custos, foi feita uma pesquisa de mercado em *sites* de lojas de eletrodomésticos e equipamentos eletrônicos (Tabela 80). Espera-se redução de preços das lâmpadas LED no médio prazo. Para isso, tomaram-se como referência as projeções da EIA (2014b) que projetam que o custo da lâmpada LED, em 2050, vai ser similar ao da lâmpada fluorescente compacta. A conversão de reais para dólar americano deu-se à taxa de R\$ 2,17/US\$, oriunda do cenário macroeconômico elaborado para o projeto por Haddad (2015).

Tabela 80 – Custos das Tecnologias de Iluminação Utilizadas no Setor Residencial (US\$)

Custo por tecnologia	2015	2050
FT (fluorescente tubular)	4,6	4,4
FC (fluorescente compacta)	3,7	3,5
INC (incandescente)	0,9	1,0
LED	41,5	4,1

Fonte: Elaboração própria a partir de EIA, 2014b

No cenário BC, considera-se o crescimento significativo da participação da tecnologia de LED para iluminação em residências, substituindo tanto fluorescentes compactas quanto tubulares a partir de 2015, conforme Figura 125.

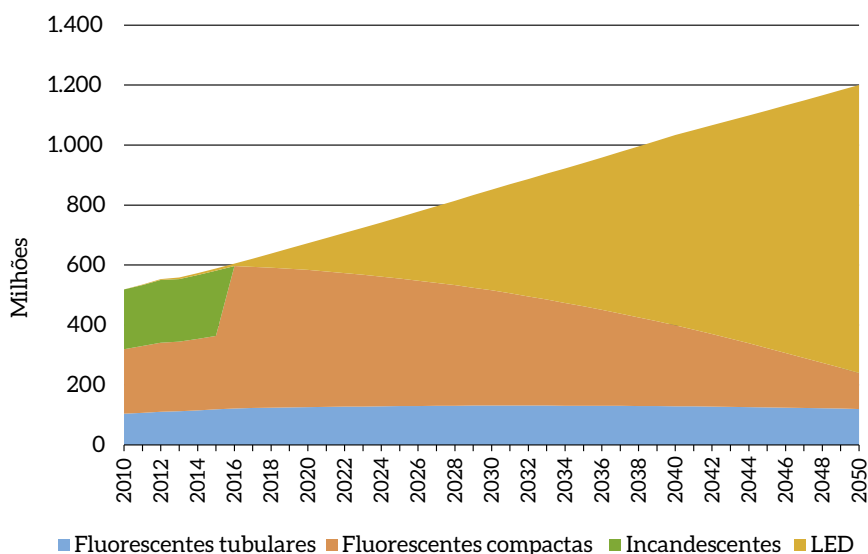


Figura 125 – Projeção de Lâmpadas no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 126 mostra as vendas de lâmpadas por tecnologia para o cenário BC. Destaca-se maior penetração de LED no mercado, por ter maior vida útil e reduzir os picos de vendas das lâmpadas fluorescentes compactas, dado pelo esgotamento da vida útil das lâmpadas vendidas para suprir a queda nas vendas de lâmpadas incandescentes em 2016. Ao mesmo tempo, em termos totais, também reduz o número de vendas de lâmpadas.

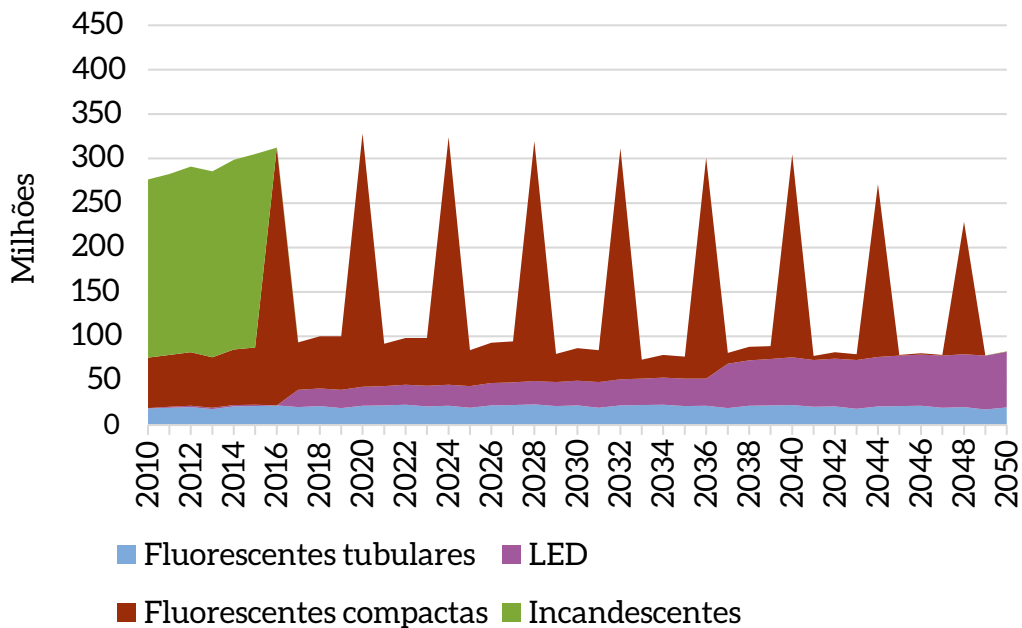


Figura 126 – Vendas de Lâmpadas no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

5.4.1.2 RESULTADOS

A Figura 127 mostra o consumo de energia dos dois cenários analisados, assim como as emissões evitadas pela implementação do cenário BC. É importante notar que, pela implementação da Portaria Interministerial MME, MCTI e MDIC nº 1.007/2010 (MME, 2010), em 2016, haveria redução de aproximadamente 744 ktep (9 TWh) em ambos os cenários. Em 2050, com a implementação do cenário BC, as reduções seriam de 430 ktep (5 TWh) e 1,6 MtCO₂.

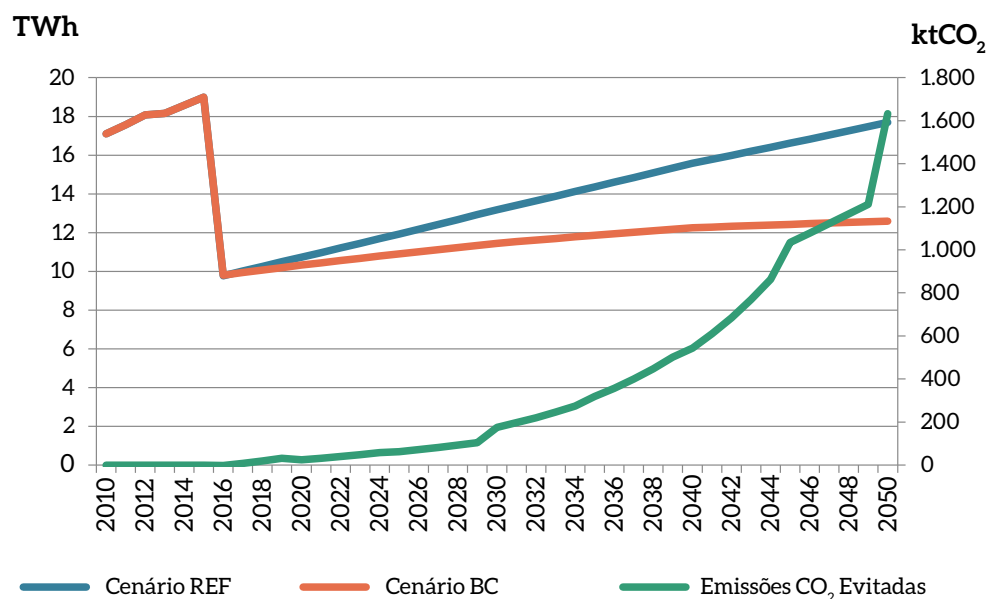


Figura 127 – Emissões e Consumo de Energia por Cenário (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

No cenário BC, mesmo tendo a tecnologia predominante (LED) um custo de investimento maior, a economia resultante do menor consumo é significativa e resulta no descolamento das curvas já a partir de 2015. Em termos gerais, no acumulado até 2050 e considerando uma taxa de desconto de 23,8%, a implementação do cenário BC para tecnologias de iluminação no setor residencial significa um custo adicional de US\$ 367 milhões em relação ao cenário REF. Não obstante, a medida representa 6.965 ktep conservados e 15 MtCO₂ evitados até 2050.

5.4.2 CLIMATIZAÇÃO

5.4.2.1 AR-CONDICIONADO

5.4.2.1.1 PREMISSAS

A metodologia *bottom-up* utilizada para projeção de demanda de energia final dos equipamentos de ar-condicionado no setor residencial seguiu a Equação 2.

Os parâmetros das tecnologias de ar-condicionado utilizados no cenário BC são apresentados na Tabela 81, incluindo os custos adotados.⁵¹ As tecnologias eficientes se basearam nos padrões de alta eficiência de Energy Star (2014c).

⁵¹ Os custos das tecnologias *split* incluem custos de instalação, que abrangem uma obra no domicílio (demolição, encanamento etc.).

Tabela 81 – Características e Custos das Tecnologias para Ar-condicionado Utilizadas no Setor Residencial

Marca	Capacidade (kW térmico)	EER	Capacidade (kW elétrico)	Preço (US\$ 2010)
Split padrão	2,6	3,0	0,86	1.361
Split eficiente*	2,6	16,1	0,86	3.111
Janela padrão	2,6	3,0	0,86	527
Janela eficiente*	2,6	9,8	0,86	1.022

Nota: * tecnologias consideradas no cenário BC

Fonte: Elaboração própria a partir de ENERGY STAR, 2014c

No cenário BC, considerou-se uma medida em que, a partir de 2015, só será possível comercializar equipamentos de ar-condicionado “eficientes” (Tabela 81). A ideia é avaliar um potencial total, considerando a premissa de que os equipamentos serão trocados apenas ao final de sua vida útil.

A Figura 128 mostra o cenário de vendas de ar-condicionado no cenário BC. A Figura 129, por sua vez, mostra os equipamentos de ar-condicionado instalados por tipo de tecnologia segundo as vendas projetadas.

Vendas anuais

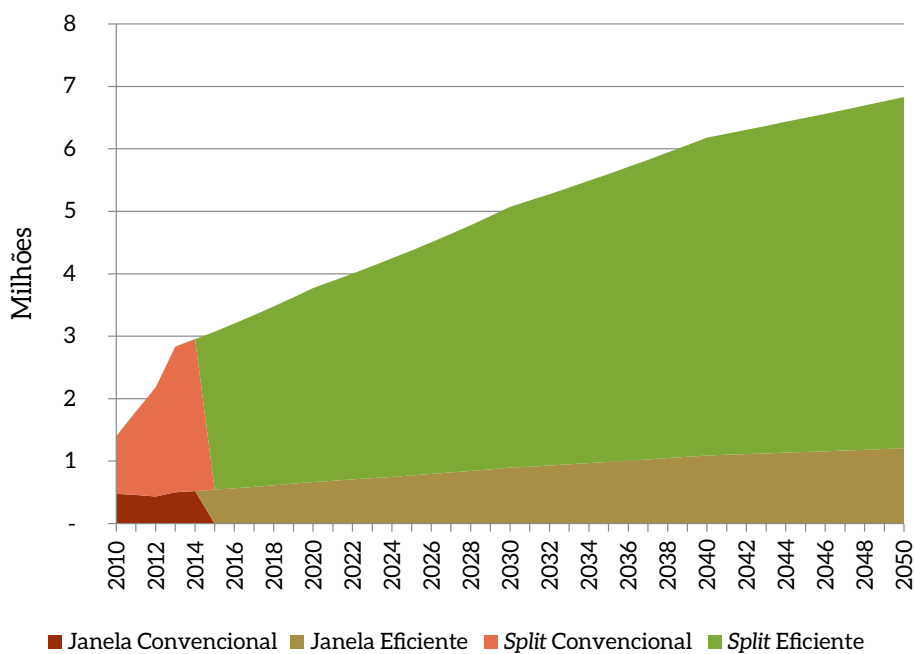


Figura 128 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado por Tecnologia no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

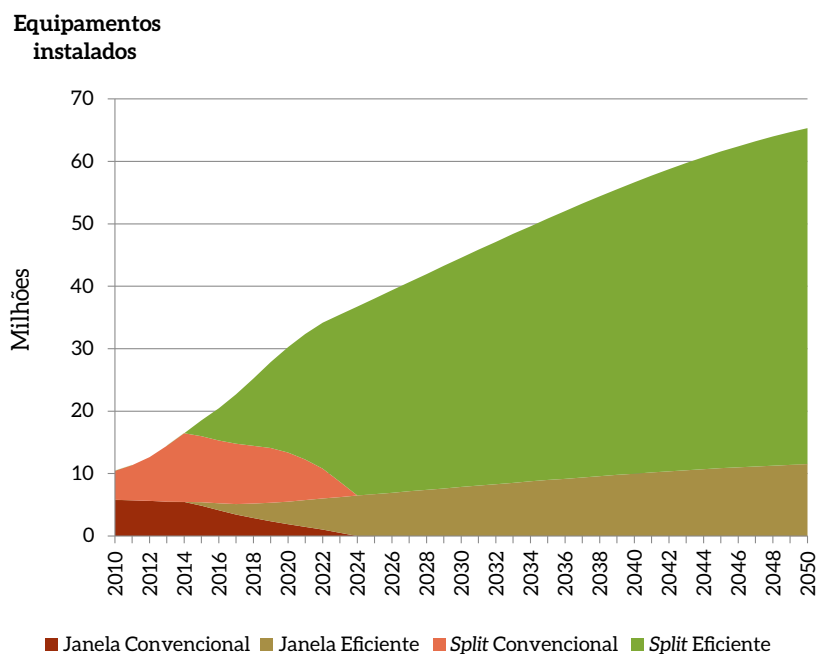


Figura 129 – Projeção de Equipamentos de Ar-condicionado por Tecnologia no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

5.4.2.1.2 RESULTADOS

Utilizando as projeções de equipamentos instalados e os parâmetros da Tabela 81, calculam-se o consumo de energia para os dois cenários e as emissões de CO₂ evitadas (Figura 130).

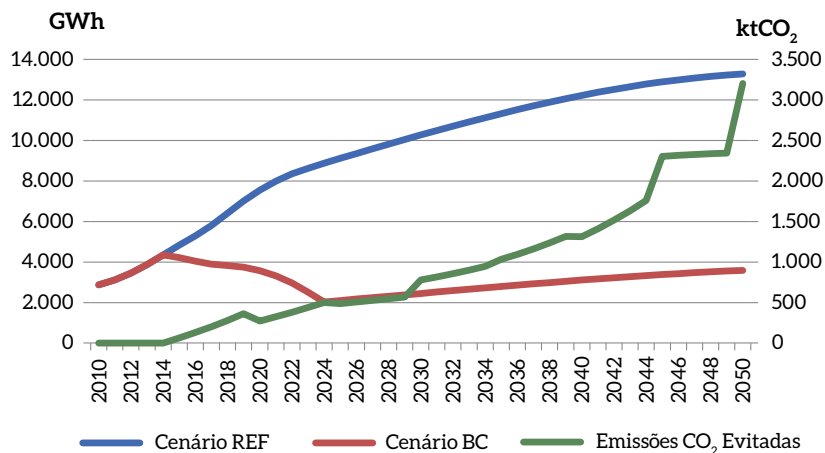


Figura 130 – Energia Consumida e Emissões de CO₂ Evitadas pelos Equipamentos de Ar-condicionado nos Cenários REF e BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Com base nos custos dos equipamentos (Tabela 82) e da energia (Tabela 76), estimam-se Capex e Opex para os cenários REF (Figura 131) e BC (Figura 132) referentes aos equipamentos de ar-condicionado.

Bilhões de US\$

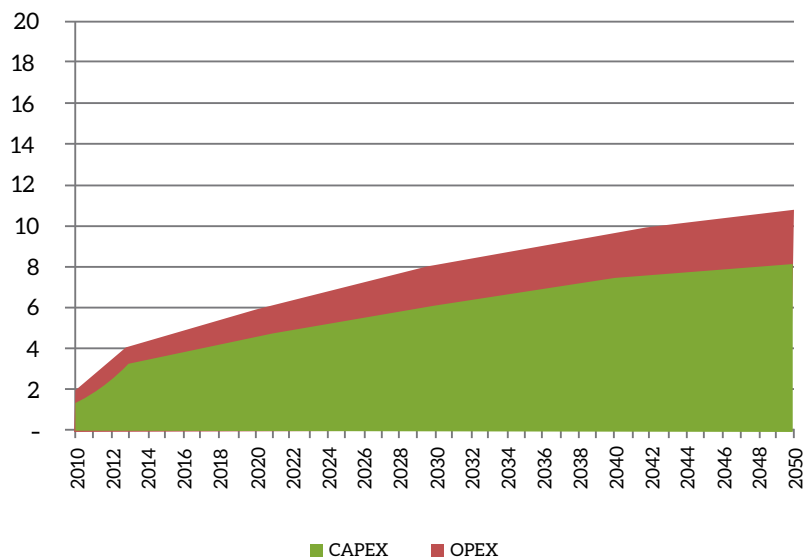


Figura 131 – Capex e Opex do Ar-condicionado no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Bilhões de US\$

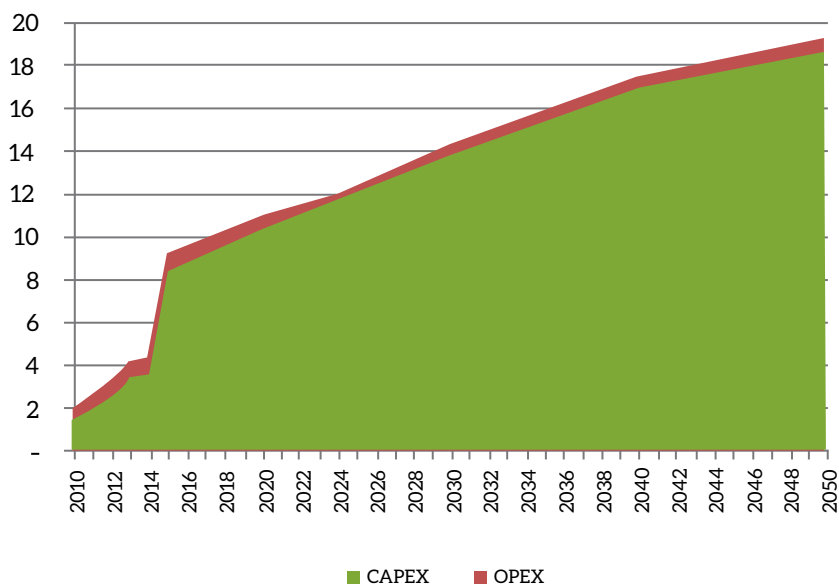


Figura 132 – Capex e Opex do Ar-condicionado no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Em termos gerais, no acumulado de 2010 a 2050 e levando em consideração uma taxa de desconto de 23,85%, a implementação do cenário BC para equipamentos de ar-condicionado no setor residencial gera um custo adicional de US\$ 236.732 milhões em relação ao cenário REF. Ademais, a medida de mitigação representa 22.528 ktep conservados e 38 MtCO₂ evitados, com um custo marginal de abatimento de US\$ 6.200/tCO₂.

No caso dos ventiladores, foram desconsiderados ganhos de eficiência energética no cenário BC.

5.4.3 REFRIGERAÇÃO

A metodologia *bottom-up* para a construção dos cenários de consumo de energia dos equipamentos de refrigeração utilizados no setor residencial () foi expressa na Equação 10.

As estatísticas existentes de geladeiras e *freezers* são de posse domiciliar (IBGE, 2012b). Porém, como é preciso projetar as vendas para estimar os custos de capital, a cada ano, foi realizada uma estimativa das vendas em função da posse projetada (Equação 25).

$$vendas_{i,j,t_0} = posse_{t_0} \cdot residências_{i,t_0} - \sum_{t=t_0-n_{j,i}}^{t_0-1} vendas_{i,j,t} \quad (25)$$

Em que,

$vendas_{i,j,t_0}$: são as vendas estimadas no ano de análise;

$posse_{t_0}$: é a posse de equipamentos no ano de análise;

n : é a vida útil dos equipamentos (geladeiras/*freezers*);

$vendas_{i,j,t}$: são as vendas de equipamentos de geladeiras/*freezers* por tipo e por regiões no ano .

Utilizou-se um tempo de vida útil para as geladeiras e *freezers* de 12 anos (ELETROBRAS-PROCEL, 2007)

5.4.3.1 GELADEIRA

5.4.3.1.1 PREMISSAS

Para o caso das geladeiras, as tecnologias utilizadas são mostradas na Tabela 82, incluindo custos. A geladeira eficiente foi baseada em parâmetros e custos das geladeiras certificadas como Energy Star (2014a). Para as geladeiras de alta eficiência, padrões da União Europeia (TOPTEN.EU, 2015) foram utilizados como referência.

Tabela 82 – Características e Custos das Tecnologias de Geladeiras Utilizadas no Setor Residencial

Tecnologia	L	kWh/ano	kW-ano	kWh-ano/L	Preço (US\$ 2010)
Geladeira padrão	282,3	367	0,042	1,30	570
Geladeira eficiente*	282,3	211	0,024	0,75	1.006
Geladeira de alta eficiência*	282,3	135	0,015	0,48	1.526

Nota: * tecnologias consideradas no cenário BC

Fonte: Elaboração própria a partir de TOPTEN.EU, 2015

No cenário BC, considerou-se a penetração de geladeiras mais eficientes em duas fases: um período transitório, de 2015 a 2020, quando a reposição do sucateamento da frota de geladeiras é feita com “geladeiras eficientes”; e uma segunda fase, a partir de 2021, em que se assume a penetração de “geladeiras de alta eficiência” (ver Tabela 82) em domicílios com rendimentos menores que dez salários mínimos (IBGE, 2011). Em domicílios com rendimentos maiores que dez salários mínimos, “geladeira eficientes” são adotadas. Essa premissa reflete a preferência de classes mais altas por geladeiras com características das geladeiras americanas, de maior volume e maior gasto energético.

A Figura 133 mostra o cenário de vendas de geladeiras no cenário BC, e a Figura 134 mostra o estoque de geladeiras por tipo de tecnologia segundo as vendas projetadas no mesmo cenário.

Vendas anuais

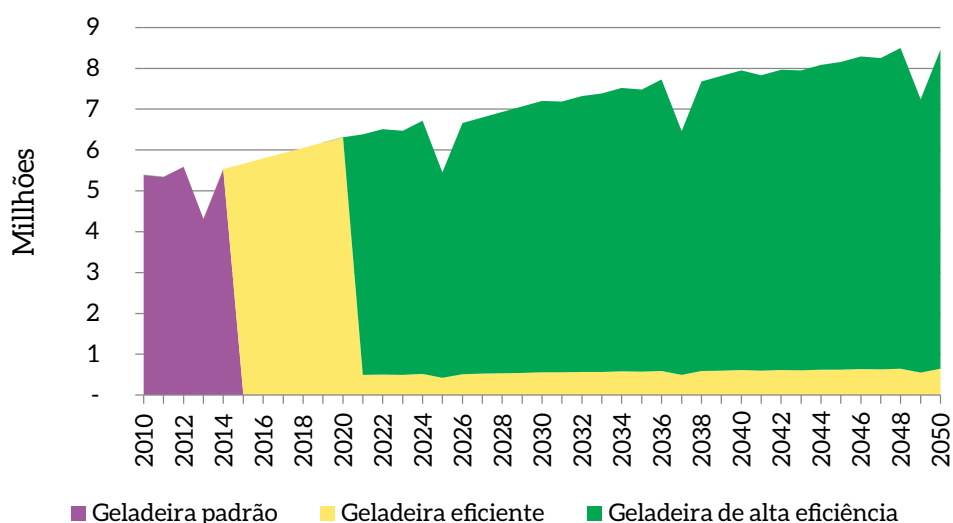


Figura 133 – Projeção de Vendas de Geladeiras para o Setor Residencial no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

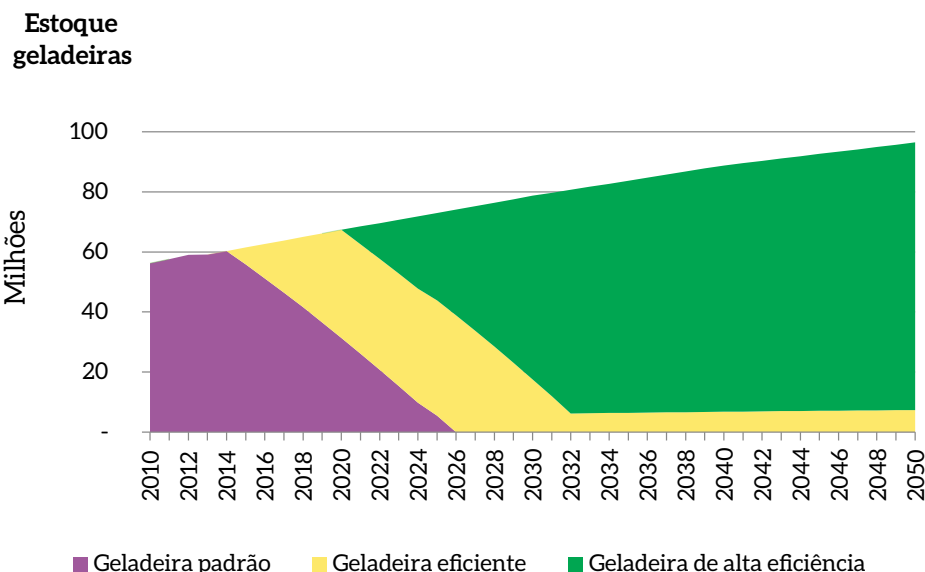


Figura 134 – Projeção de Estoque de Geladeiras para o Setor Residencial no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

5.4.3.1.2 RESULTADOS

Utilizando os resultados de estoque de geladeiras e os parâmetros da Tabela 82, calculam-se o consumo de energia para os dois cenários e as emissões de CO₂ evitadas (Figura 135). Observa-se redução acumulada nas emissões até 2050 de aproximadamente 96 MtCO₂.

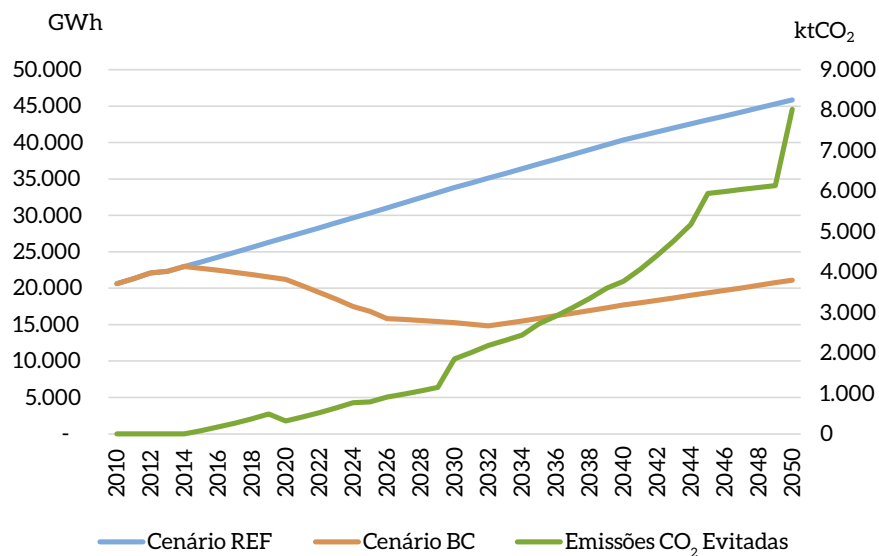


Figura 135 – Energia Consumida e Emissões de CO₂ Evitadas pelas Geladeiras no Setor Residencial nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

Com base nos custos dos equipamentos (Tabela 82) e nos custos de energia (Tabela 76), estimam-se Capex e Opex para cada cenário (Figura 136 e Figura 137), para as geladeiras.

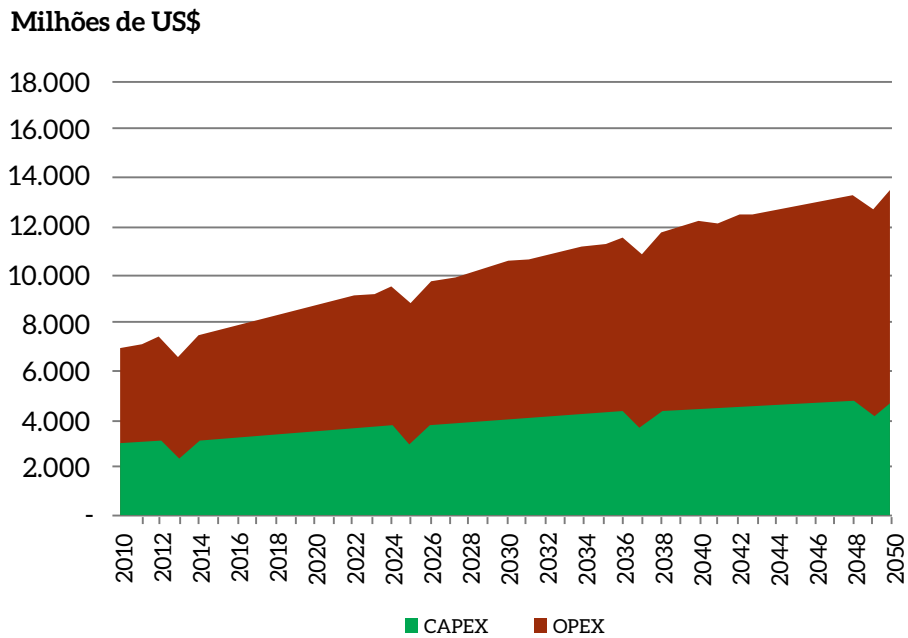


Figura 136 – Capex e Opex da Geladeira a Valor Nominal no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

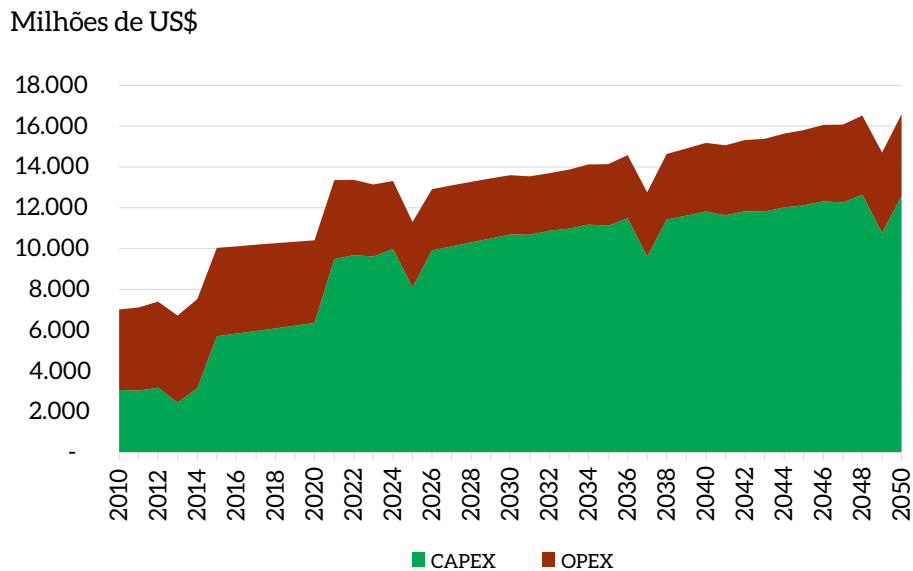


Figura 137 – Capex e Opex da Geladeira a Valor Nominal no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

No acumulado até 2050, considerando uma taxa de desconto de 23,85%, a implementação do cenário BC para geladeiras no setor residencial teria custo adicional de US\$ 4.457 milhões em relação ao cenário REF. Além do mais, a medida de mitigação considerada representa 52.279 ktep conservados e 96 MtCO₂ evitados.

5.4.3.2FREEZER

5.4.3.2.1PREMISSAS

Para o caso dos *freezers* no setor residencial, utilizaram-se as tecnologias mostradas na Tabela 83, incluindo os custos considerados. O “*freezer* eficiente” foi baseado em parâmetros e custos dos *freezers* com padrões da União Europeia (TOPTEN.EU, 2015).

Para o cenário BC, considerou-se que, a partir de 2015, só será possível comercializar “*freezers* eficientes”.

Tabela 83 – Características e Custos das Tecnologias de Freezers Utilizados

Marca	Litro	kWh/ano	kW-ano	kWh-ano/Litro	Preço (US\$ 2010)
Freezer padrão	200,0	374	0,042732246	1,8716	449
Freezer eficiente*	200,0	111	0,012683917	0,5556	982

Nota: * Tecnologia considerada no cenário BC
Fonte: Elaboração própria a partir de TOPTEN.EU, 2015

A Figura 138 mostra o cenário de vendas de *freezers* no cenário, e a Figura 139 mostra os equipamentos de *freezers* instalados por tipo de tecnologia segundo as vendas projetadas.

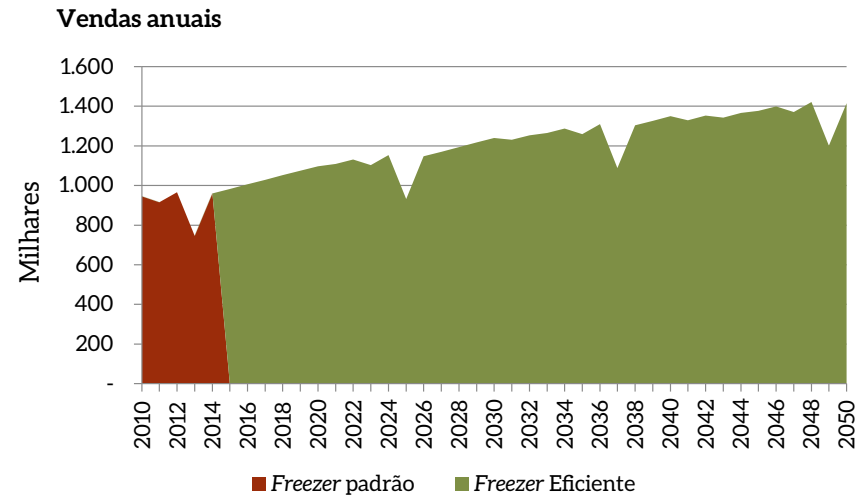


Figura 138 – Projeção de Vendas de Freezers no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

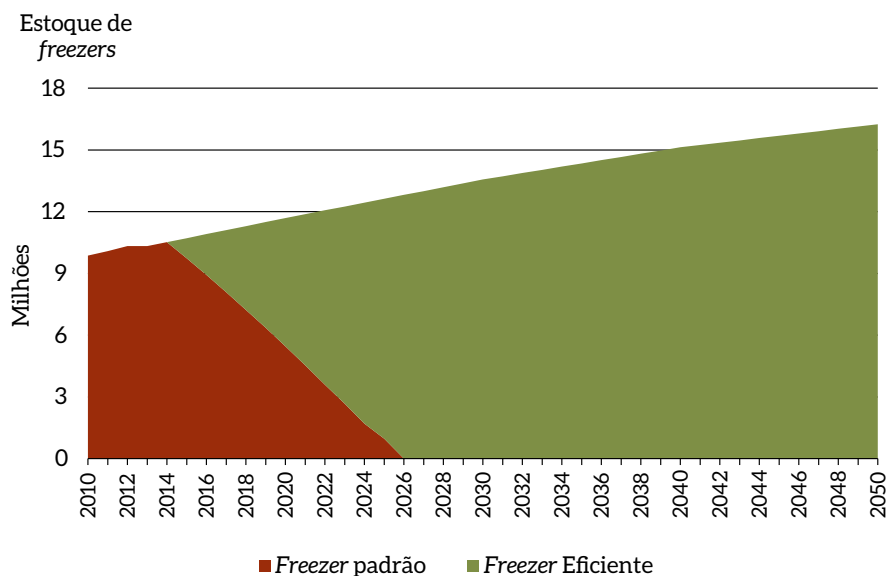


Figura 139 – Projeção de Estoque de Freezers no Cenário BC por Tecnologia (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

5.4.3.2.2 RESULTADOS

Considerando os resultados de estoque de freezers e os parâmetros da Tabela 84, calcularam-se o consumo de energia para os dois cenários e as emissões de CO₂ evitadas (Figura 140).

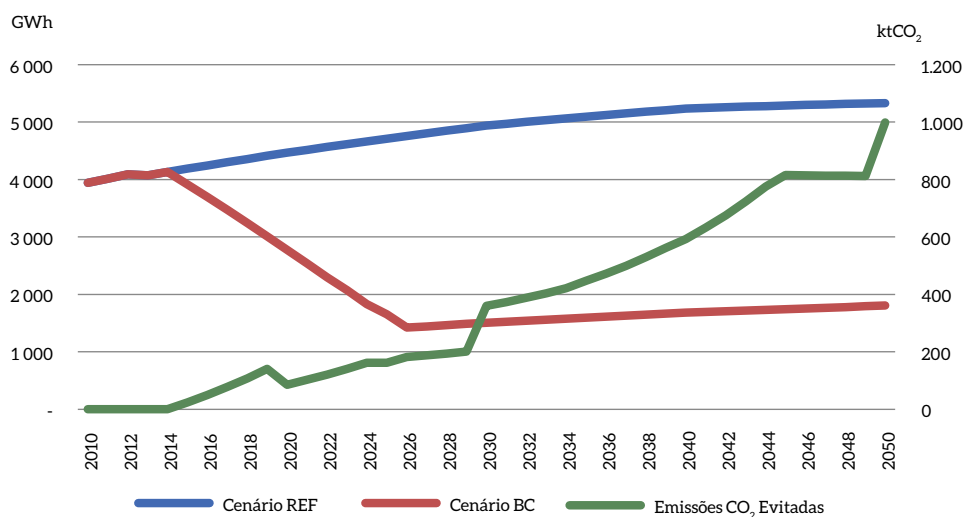


Figura 140 – Energia Consumida e Emissões de CO₂ Evitadas pelos Freezers no Setor Residencial nos Cenários REF e BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Com base nos custos dos equipamentos (Tabela 83) e nos custos energia, estimaram-se Capex e Opex para cada cenário (Figura 141 e Figura 142), para os freezers, no setor residencial.

Milhões de US\$

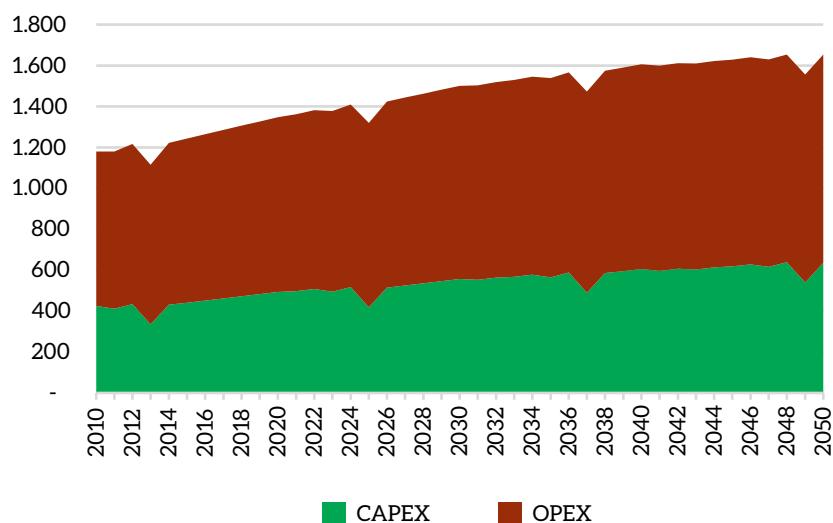


Figura 141 – Capex e Opex de Freezer a Valor Nominal no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Milhões de US\$

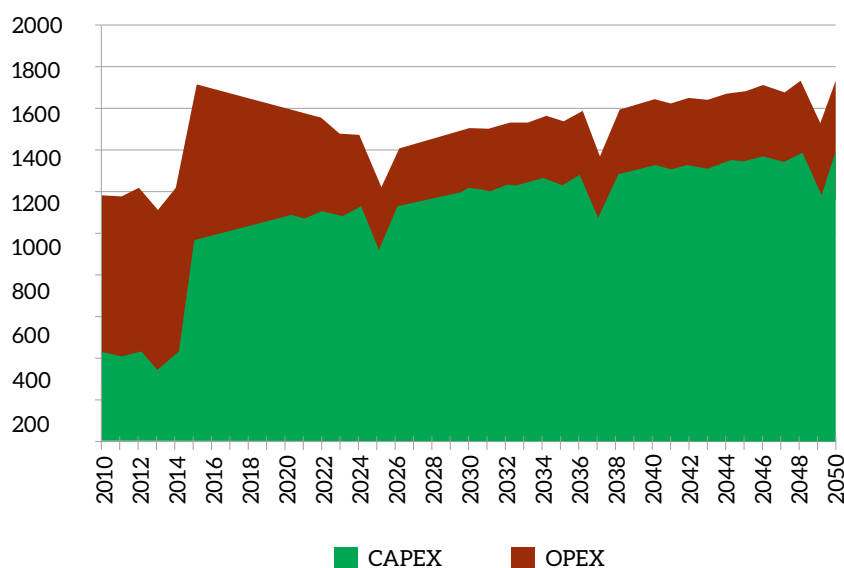


Figura 142 – Capex e Opex de Freezer a Valor Nominal no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Considerando uma taxa de desconto real para o setor residencial de 23,85%, a implementação da medida de eficiência propostas no cenário BC para *freezers* representa custo adicional de US\$ 543 milhões em relação ao cenário REF, para o período 2010-2050. O total de emissões evitadas é de 15 MtCO₂, o que significa 9.114 ktep (106 TWh) de energia conservados.

5.4.4 Cocção

5.4.4.1 *PREMISSAS*

Foram consideradas duas medidas principais para a redução das emissões de CO₂ referentes ao uso de energia final para cocção: eficiência de fogões a GLP e eficiência de fogões a gás natural. Ademais, assumiu-se que todos os domicílios brasileiros possuirão ao menos um fogão até 2050, isso tendo como base IBGE (2013). As regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste atingem esse percentual em 2020, enquanto Norte e Nordeste, em 2050.

Em seguida, a partir do consumo nacional de energia para cocção, foram estabelecidos os consumos regionais, com base em Sindigás (2015) e Abegás (2015), tanto para GLP quanto para gás natural.

Os percentuais de penetração de mercado, por fonte, foram estabelecidos com base no PNE 2050 (EPE, 2014a). Conforme informado anteriormente, não se considerou a troca de combustíveis como uma medida de mitigação, visto que essa escolha é função da oferta de combustíveis e da expansão de infraestrutura de transporte. A Figura 143 apresenta os valores percentuais utilizados como referência para elaboração dos valores máximos de penetração de 2010 a 2050, por fonte combustível.

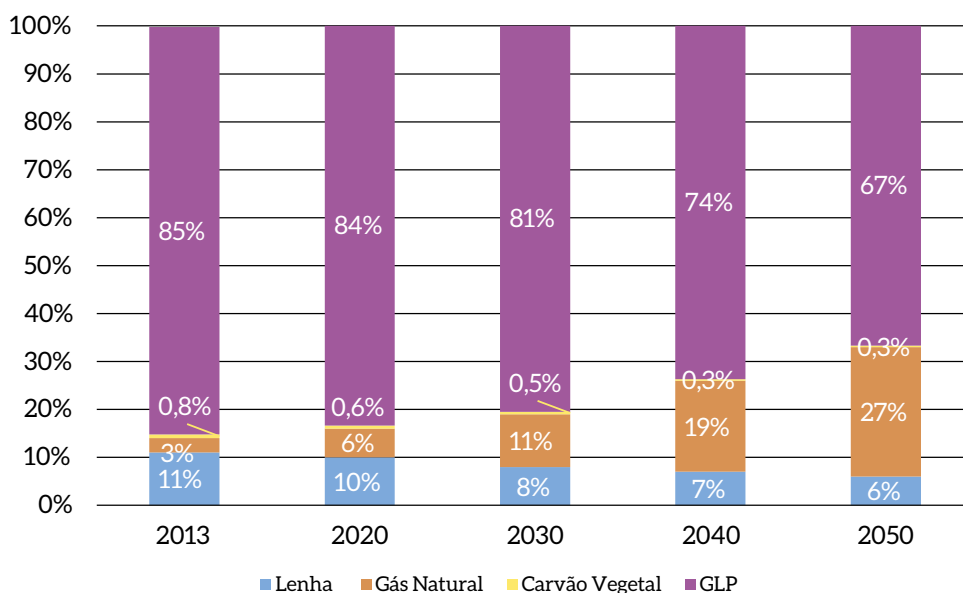


Figura 143 – Participação das Fontes na Cocção nos Domicílios (2013-2050)

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2014a

Para cálculo do investimento necessário de cada medida, foram estimadas curvas hipotéticas de venda para fogões a GLP e a gás natural, de 2010 a 2050. Além disso, foi adotada uma vida útil média de 15 anos para fogões a GLP e a gás natural.

Quanto às tecnologias, conforme anteriormente ressaltado, pressupôs-se a entrada de fogões mais eficientes, com preço estimado em US\$ 500,00, tanto para GLP quanto para gás natural, ao final da vida útil dos equipamentos antigos.

Para o cálculo do consumo de energia elétrica evitado em cada medida, pressupôs-se a evolução (entre 2010 e 2050) dos padrões mínimos de eficiência de fogões a GLP e gás natural (de 30% para 45%), tendo como referência o selo A do PBE, do Inmetro.

A partir do consumo evitado de energia, calculou-se a quantidade de CO₂ abatida de cada medida, aplicando-se os fatores de emissão do *grid* por região. O cálculo do custo de abatimento considera o investimento líquido de cada medida, isto é, o montante investido (e custos operacionais da tecnologia) menos o valor economizado com a redução do consumo energético. O custo marginal é obtido pela razão entre investimento líquido e quantidade abatida de CO₂.

5.4.4.2 RESULTADOS

Com base nos custos dos equipamentos, na evolução das vendas e dos estoques, e dos custos de energia, foram estimados Capex e Opex. O custo evitado de energia é resultado da penetração de fogões a GLP mais eficientes. A Figura 144 traz a evolução desses custos em relação ao custo evitado de energia proporcionado pela melhoria da eficiência de fogões a GLP, considerando uma taxa real de desconto de 23,85% para o setor residencial.

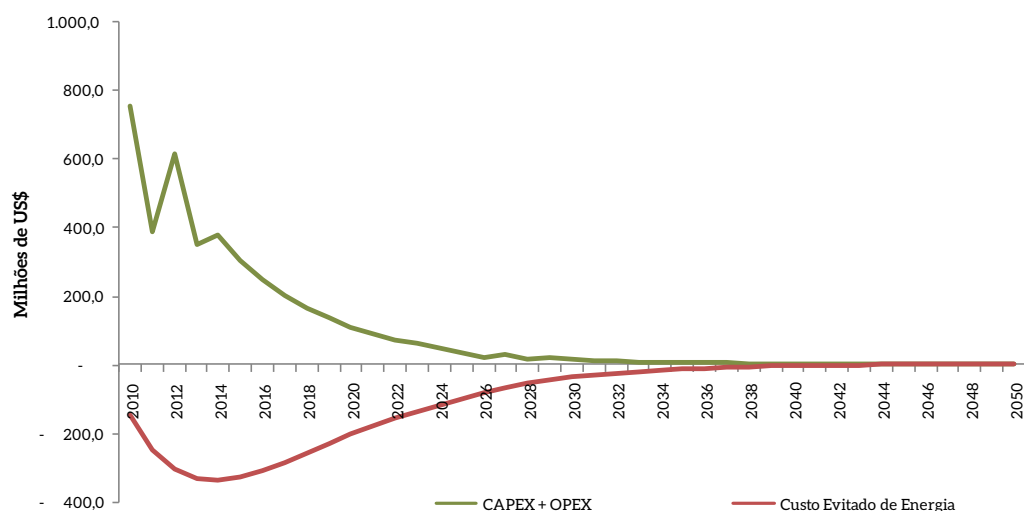


Figura 144 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficientização de Fogões a GLP (2010-2050 em milhões de US\$)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 145 traz a evolução dos custos de capital e operacionais em relação ao custo evitado de energia proporcionado pela melhoria da eficiência de fogões a gás natural, considerando uma taxa real de desconto de 23,85% para o setor residencial.

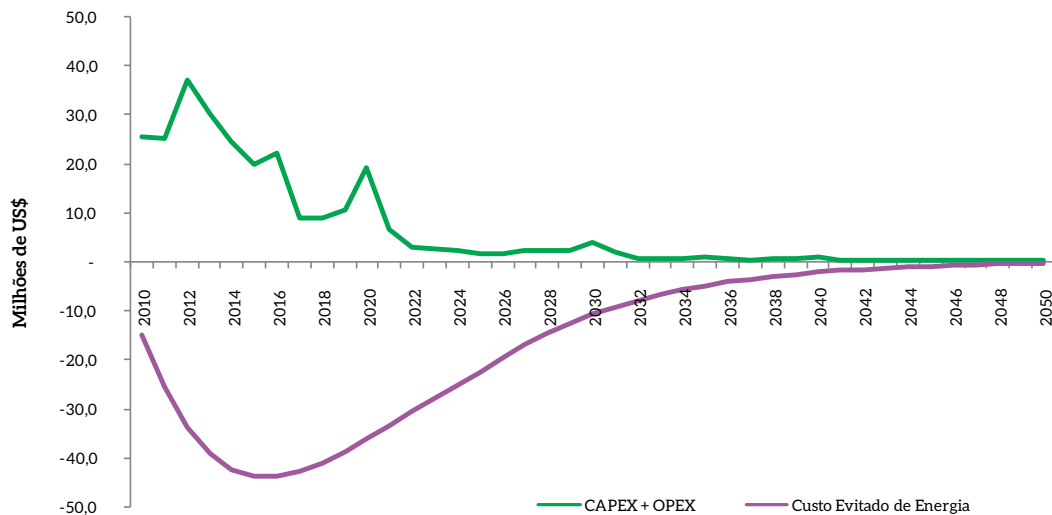


Figura 145 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficientização de Fogões a Gás Natural (2010-2050 em milhões de US\$)

Fonte: Elaboração própria

A partir desses resultados e considerando a evolução da penetração de tecnologias mais eficientes, calcularam-se o consumo de energia para os cenários REF e BC e as emissões de CO₂ evitadas. A Figura 146 apresenta a evolução da quantidade de CO₂ abatida, entre 2010 e 2050, em relação ao consumo de energia de fogões a GLP nos cenários REF e BC.

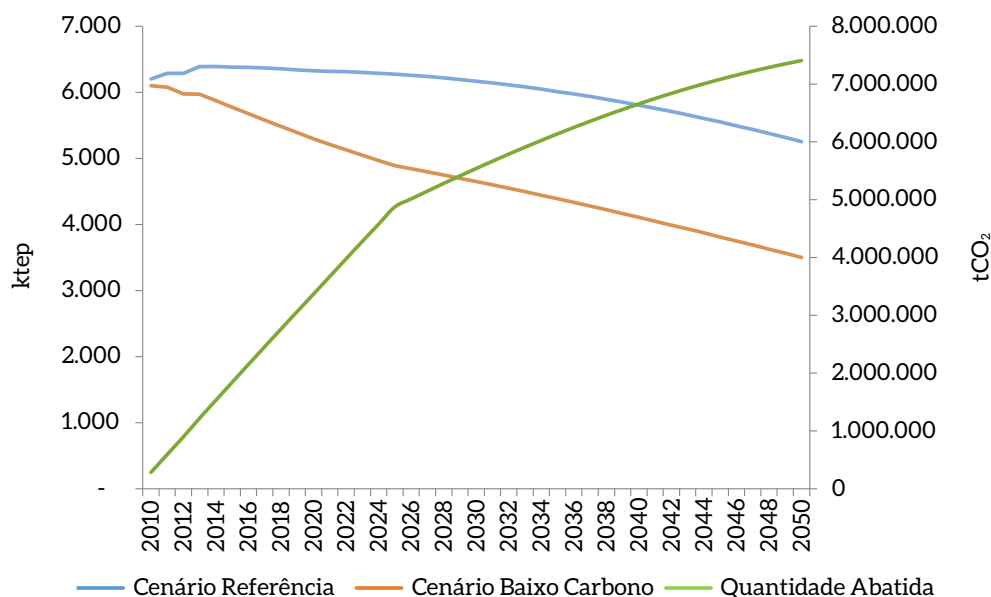


Figura 146 – Consumo de Energia de Fogões a GLP e Quantidade de CO₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 147 apresenta a evolução da quantidade de CO₂ abatida, entre 2010 e 2050, em relação ao consumo de energia de fogões a gás natural nos mesmos cenários.

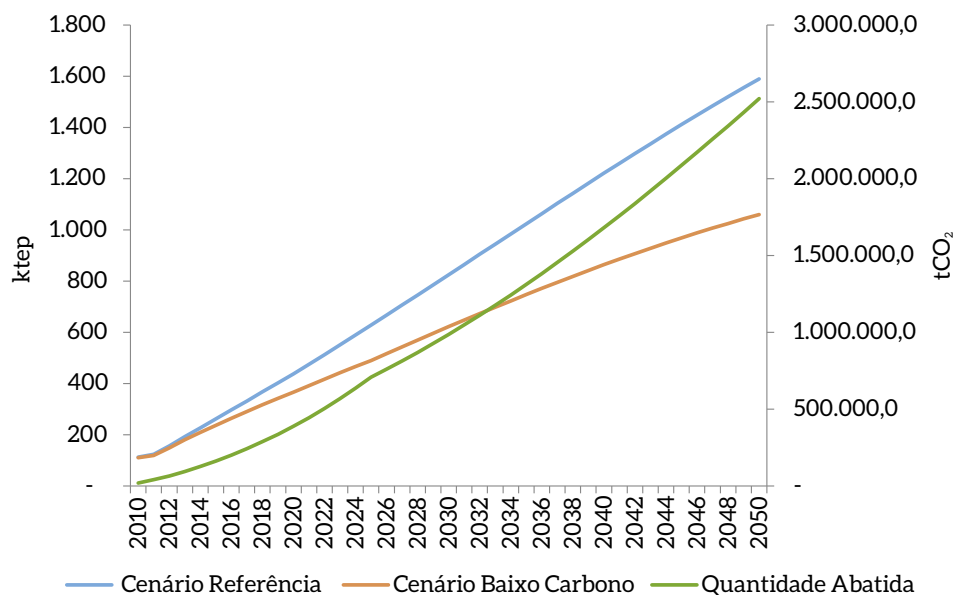


Figura 147 – Consumo de Energia de Fogões a Gás Natural e Quantidade de CO₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

O custo de abatimento foi obtido pela diferença entre o custo de capital/operacional e o custo evitado de energia, considerando o fator de emissão do *grid*. A Tabela 84 apresenta a quantidade de CO₂ abatida acumulada e o custo de abatimento, por medida. O custo de abatimento total foi calculado pela média ponderada das duas medidas.

Tabela 84 – Quantidade Abatida e Custo de Abatimento por Medida (cocção)

Medida	Quantidade Abatida (MtCO ₂)	Custo de Abatimento (US\$/tCO ₂)
Eficientização de fogões GLP	200,79	-10,2
Eficientização de fogões GN	44,05	-487,6

Fonte: Elaboração própria

Considerando taxa de desconto real para o setor residencial de 23,85%, a implementação das medidas de efficientização propostas no cenário BC implica emissão total evitada de 244,84 MtCO₂.

Deve-se ressaltar que não foi considerada redução de emissões de GEE para o consumo de lenha e carvão vegetal para cocção. Portanto, o consumo energético dessas fontes é idêntico ao apresentado no cenário REF.

5.4.5 AQUECIMENTO DE ÁGUA

5.4.5.1 *PREMISSAS*

Foram consideradas três medidas principais para a redução das emissões de CO₂ referentes ao uso de energia final para aquecimento de água:

- Eficientização de chuveiros elétricos;
- Eficientização de aquecedores de passagem a gás natural;
- Instalação SAS em residências.

As duas primeiras medidas pressupõem a entrada de tecnologias mais eficientes, enquanto a terceira prevê a substituição de chuveiros elétricos por SAS.⁵²

No cenário BC, os percentuais de penetração de mercado, por fonte, foram estabelecidos com base no PNE 2050, da EPE. Cabe notar que a maior penetração de SAS implicou a consequente redução do potencial de mitigação pela efficientização de chuveiros elétricos. A Figura 148 apresenta os valores percentuais utilizados como referência para elaboração dos valores máximos de penetração de 2010 a 2050, por fonte combustível.

⁵² O chuveiro elétrico é mantido como fonte auxiliar do sistema de aquecimento.

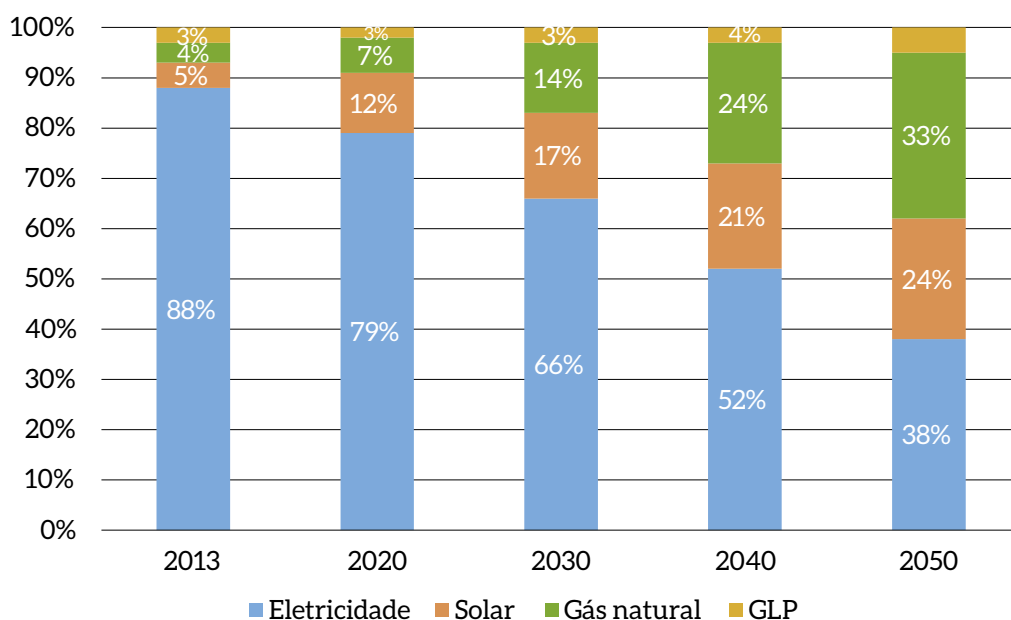


Figura 148 – Aquecimento de Água para Banho nos Domicílios por Fonte no Cenário BC (2013-2050)

Fonte: Elaborado a partir de EPE, 2014

Com base em informações dos fabricantes e da Abrava (2014a), estimaram-se a vida útil e os preços de chuveiros elétricos, aquecedores a gás natural e SAS, conforme a Tabela 85.

Tabela 85 – Vida Útil e Preços de Chuveiros Elétricos, Aquecedores a Gás Natural e SAS

Tecnologia	Vida Útil (anos)	Preço (US\$)	
		Referência	Baixo Carbono
Chuveiro elétrico	8	20,00	40,00
Aquecedor a GN/GLP	15	200,00	400,00
SAS	25	1.460,00	1.460,00

Fonte: Elaborado a partir de ABRAVA, 2014a

A partir dos valores da Tabela 85, realizou-se o cálculo de Capex e Opex de cada medida com base em curvas de venda hipotéticas estimadas para chuveiros elétricos, aquecedores a gás natural e SAS, de 2010 a 2050.

Para o cálculo do consumo evitado de energia em cada medida, pressupôs-se a obrigatoriedade de padrões mínimos de eficiência tecnológicos. Os chuveiros elétricos alcançam um nível de 98% de eficiência, enquanto os aquecedores a gás natural atingem 90%. No caso do SAS, o consumo evitado de energia corresponde à fração solar média de cada região, conforme dados da Tabela 86.

Tabela 86 – Fração Solar Média por Região (em %)

Região	Fração Solar Média
Sul	62,8%
Sudeste	72,1%
Centro-Oeste	82,1%
Nordeste	88,3%
Norte	77,4%

Fonte: Elaboração própria com base em CARDOSO; NOGUEIRA, 2011

A partir do consumo evitado de energia, calculou-se a quantidade de CO₂ abatida de cada medida, aplicando-se os fatores de emissão do *grid* por região. O cálculo do custo de abatimento considera o investimento líquido de cada medida, isto é, o montante investido (e custos operacionais da tecnologia) menos o valor economizado com a redução do consumo energético. O custo marginal é obtido pela razão entre investimento líquido e quantidade abatida de CO₂.

5.4.5.2 RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados do cenário BC para as três medidas consideradas na redução das emissões de CO₂ relacionadas ao uso final de energia para aquecimento de água.

Com base nos custos dos equipamentos e nos custos de energia, foram estimados Capex e Opex. O custo evitado de energia é resultado da penetração de tecnologias mais eficientes. A Figura 149 apresenta a evolução dos custos de capital e operacional em relação ao custo evitado de energia decorrente da eficiência de chuveiros elétricos, considerando uma taxa real de desconto de 23,85% para o setor residencial.

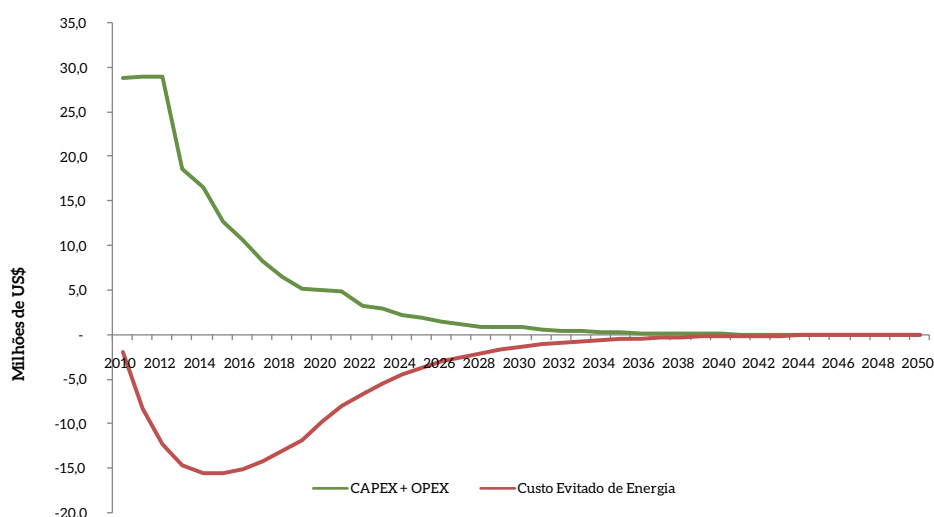


Figura 149 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficientização de Chuveiros Elétricos (2010-2050 em milhões US\$)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 150 apresenta a evolução dos custos de capital e operacional em relação ao custo evitado de energia decorrente da eficiência de aquecedores a gás natural, considerando uma taxa real de desconto de 23,85% para o setor residencial.

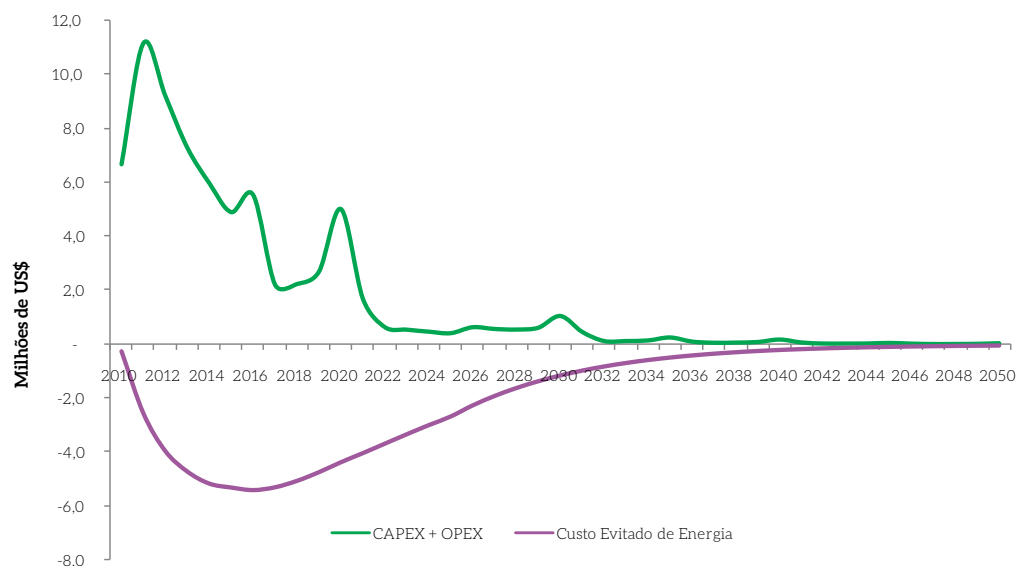


Figura 150 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Eficiência de Aquecedores a Gás Natural (2010-2050 em milhões de US\$)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 151 apresenta a evolução dos custos de capital e operacional em relação ao custo evitado de energia decorrente da substituição de chuveiros elétricos por SAS, considerando uma taxa real de desconto de 23,85% para o setor residencial.

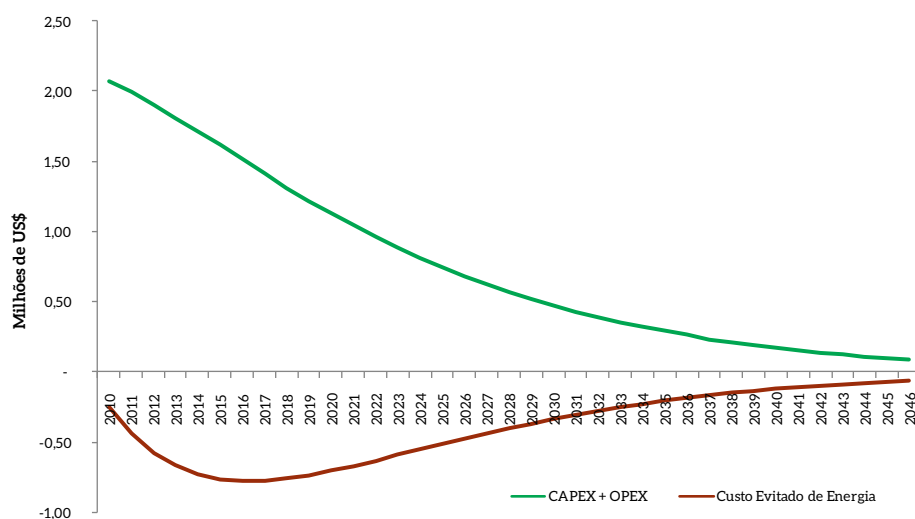


Figura 151 – Capex + Opex e Custo Evitado de Energia pela Substituição de Chuveiros Elétricos por SAS (2010-2050 em milhões de US\$)

Fonte: Elaboração própria

A partir desses resultados e considerando a evolução da penetração de tecnologias mais eficientes, calcularam-se o consumo de energia para os dois cenários e as emissões de CO₂ evitadas. A Figura 152 apresenta o consumo de energia nos cenários REF e BC e a quantidade de CO₂ abatida, resultante da efficientização de chuveiros elétricos.

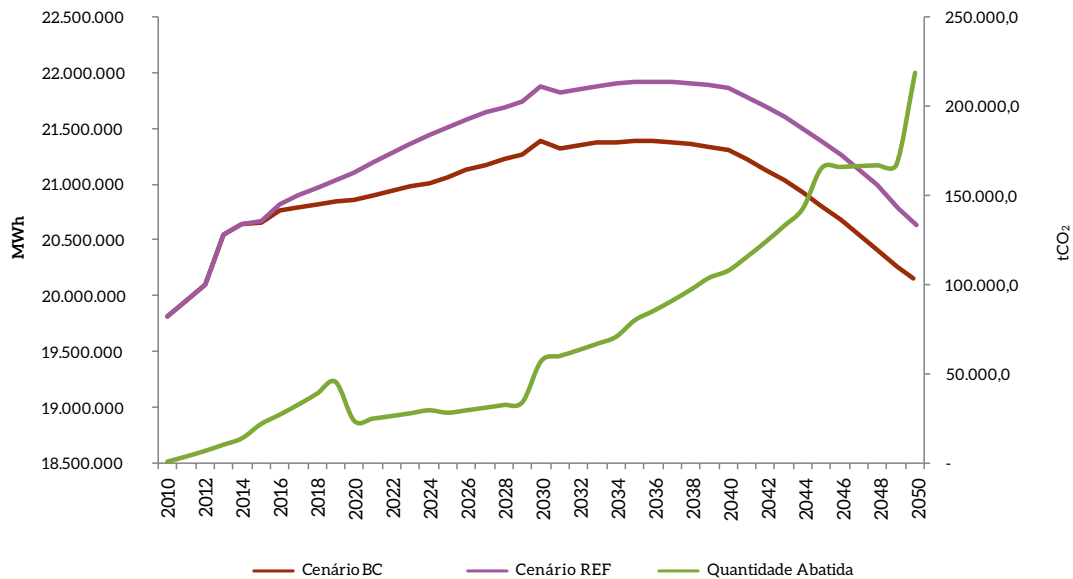


Figura 152 – Consumo de Energia por Chuveiros Elétricos e Quantidade de CO₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 153 apresenta o consumo de energia nos cenários REF e BC e a quantidade de CO₂ abatida, resultante da efficientização de aquecedores a gás natural.

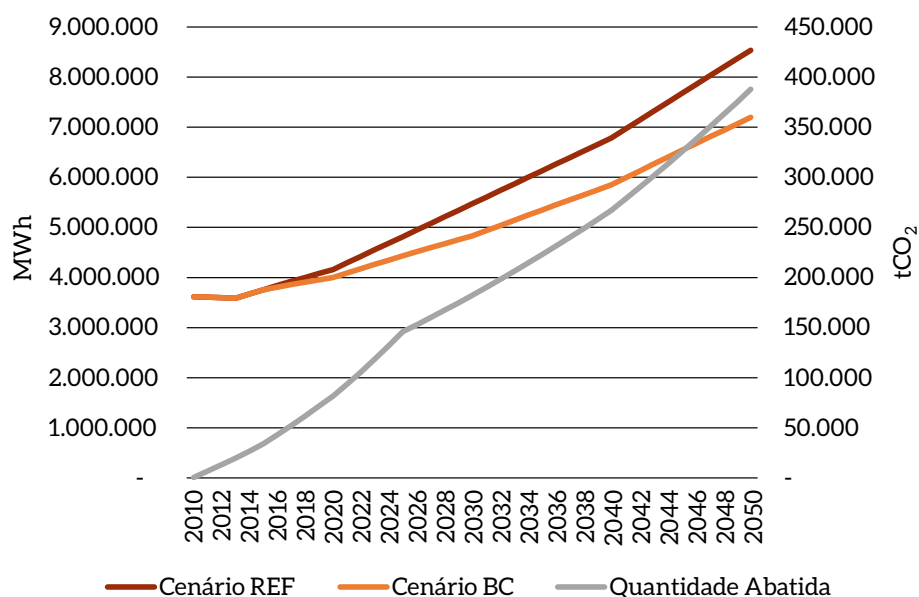


Figura 153 – Consumo de Energia de Aquecedores a Gás Natural e Quantidade de CO₂ Abatida nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

A Figura 154 apresenta o consumo evitado de energia e a quantidade de CO₂ abatida, resultantes da substituição de chuveiros elétricos por SAS.

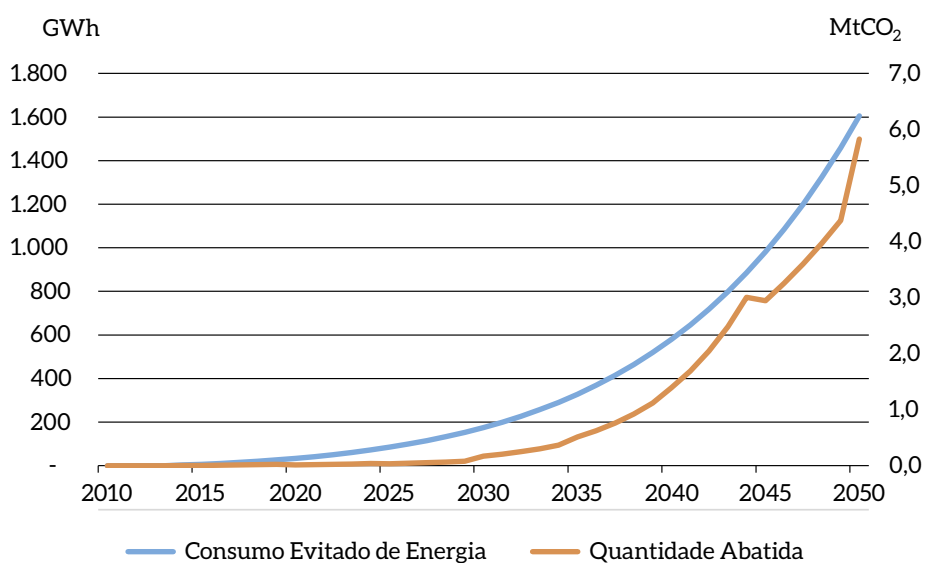


Figura 154 – Consumo Evitado de Energia pelo SAS versus Quantidade de CO₂ Abatida nos Cenários REF e BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

O custo de abatimento foi obtido pela diferença entre o custo de capital/operacional e o custo evitado de energia, considerando o fator de emissão do *grid*. A Tabela 87 apresenta a quantidade de CO₂ abatida e o custo de abatimento, por medida. O custo de abatimento total foi calculado pela média ponderada das três medidas.

Tabela 87 – Quantidade Abatida e Custo de Abatimento por Medida (aquecimento de água)

Medida	Quantidade Abatida (MtCO ₂)	Custo de Abatimento (US\$/tCO ₂)
Eficientização de aquecedores a GN	7,44	-36,0
Eficientização de chuveiros elétricos	2,93	218,0
Substituição de chuveiros elétricos por SAS	4,03	1.933,3

Fonte: Elaboração própria

Considerando taxa de desconto real para o setor residencial de 23,85%, a implementação das três medidas de efficientização propostas no cenário BC resulta em emissões evitadas de 14,40 MtCO₂ até 2050.

5.5 PREMISSAS E RESULTADOS DOS SETORES COMERCIAL, SERVIÇOS E PÚBLICO

O cenário BC para os setores comercial, serviços e público abrange a efficientização da climatização e da iluminação pública e em edificações.

5.5.1 CLIMATIZAÇÃO

5.1.1.1 PREMISSAS

Para a modelagem do consumo de energia relativo à climatização no setor comercial e serviços (incluindo prédios públicos), utilizou-se como *driver* a área útil (ÜRGE-VORSATZ et al., 2015). Com base na disponibilidade de dados, utilizaram-se diferentes metodologias para calcular a área segundo o tipo de estabelecimento. O Quadro 3 mostra as estimativas de área por tipo de estabelecimento, assim como as metodologias utilizadas.

Quadro 3 – Área Estimada por Tipo de Estabelecimento (2010)

Tipo de estabelecimento	Método utilizado	Total (milhões de m ₂)	Fonte
<i>Shoppings</i>	Dados primários	10	ABRASCE, 2015b
Hospitais	Baseado no número de leitos e taxa de área por leito	20	IBGE, 2015 RAHMAAN, 2011
Escolas	Baseado no número de escolas e uma área média por tipo de escola	271	INEP, 2015 RAHMAAN, 2011
Universidades	Baseado no número de universidades e uma área média de universidade	30	INEP, 2014 RAHMAAN, 2011
Comércio	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	1.844	EIA, 2008
Serviços de informação	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	74	EIA, 2008
Intermediação financeira e seguros	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	13	EIA, 2008
Serviços imobiliários e aluguel	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	26	EIA, 2008
Serviços de manutenção e reparação	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	4	EIA, 2008
Serviços de alojamento e alimentação	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	23	EIA, 2008
Serviços prestados às empresas	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	24	EIA, 2008
Outros serviços	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	5	EIA, 2008
Administração pública e seguridade social	Baseado no número de trabalhadores e taxas de área por trabalhador segundo tipo de atividade econômica	33	EIA, 2008

Fonte: Elaboração própria

Considerando os resultados da modelagem macroeconômica do projeto (HADDAD, 2015) para os subsetores do setor comercial e serviços, ganhos de produtividade e pessoal ocupado, e considerando uma taxa de pessoas/área para cada subsetor constante, estimou-se o crescimento da área para o setor comercial e serviços (Figura 155).

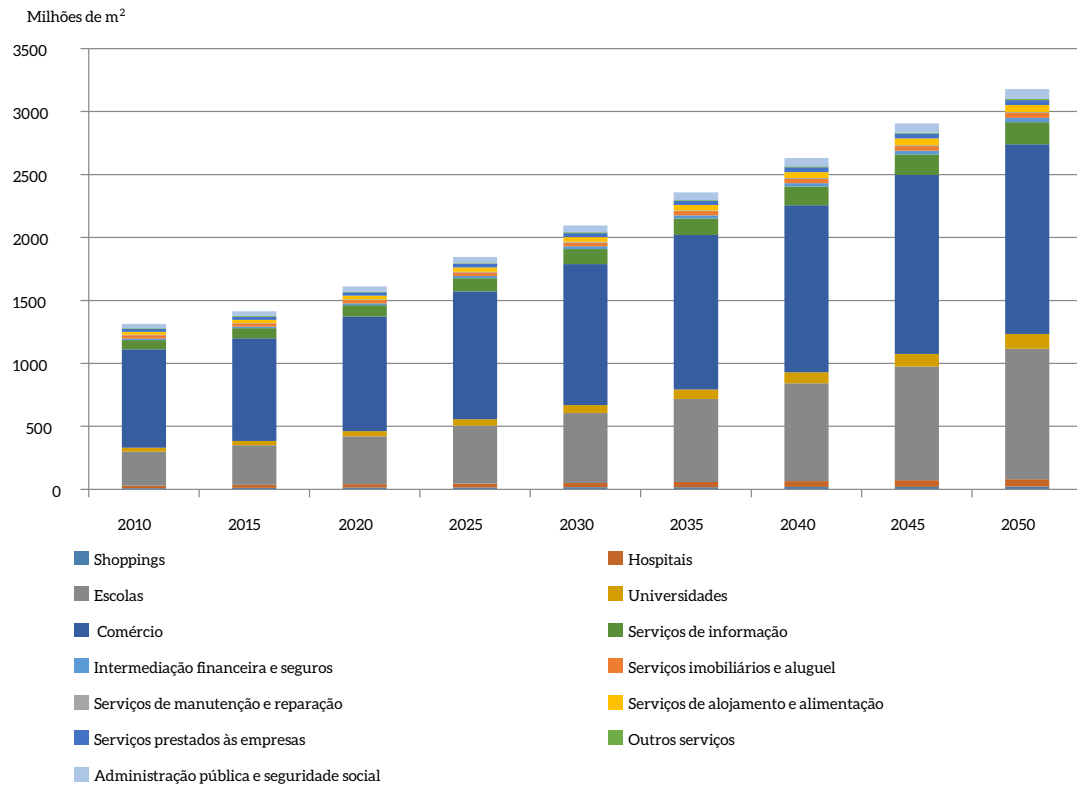


Figura 155 – Área Útil Projetada no Setor Comercial e Serviços (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

No cenário BC, considerou-se que, a partir de 2015, só será possível comercializar equipamentos de ar-condicionado “eficientes” no setor comercial e serviços. A Figura 156 mostra o cenário de vendas de ar-condicionado nesse cenário, e a Figura 157 mostra a potência instalada de equipamentos de ar-condicionado por tipo de tecnologia segundo as vendas projetadas.

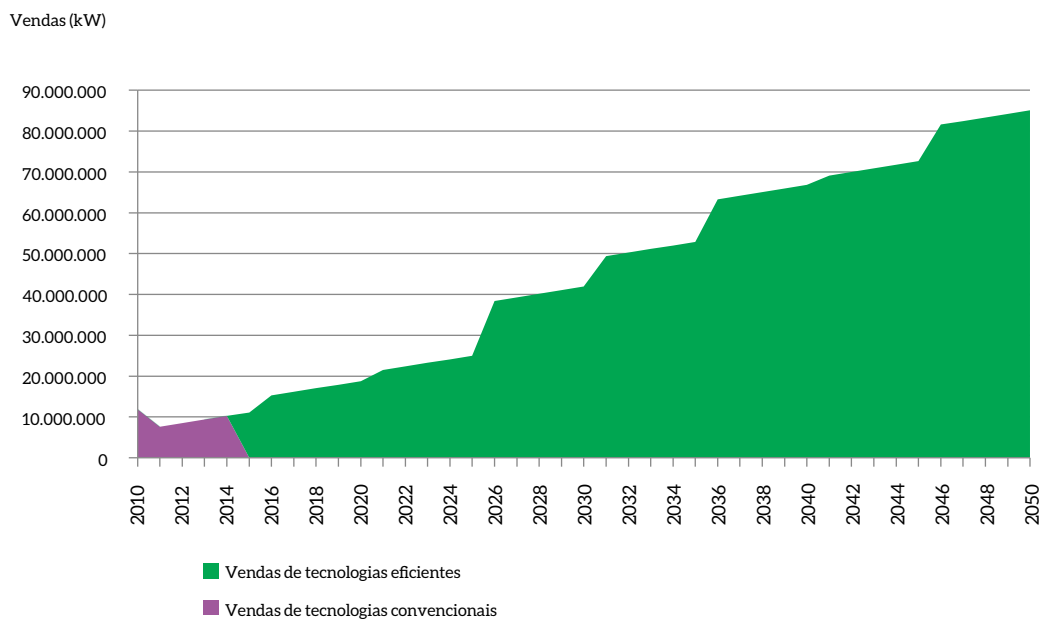


Figura 156 – Projeção de Vendas de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

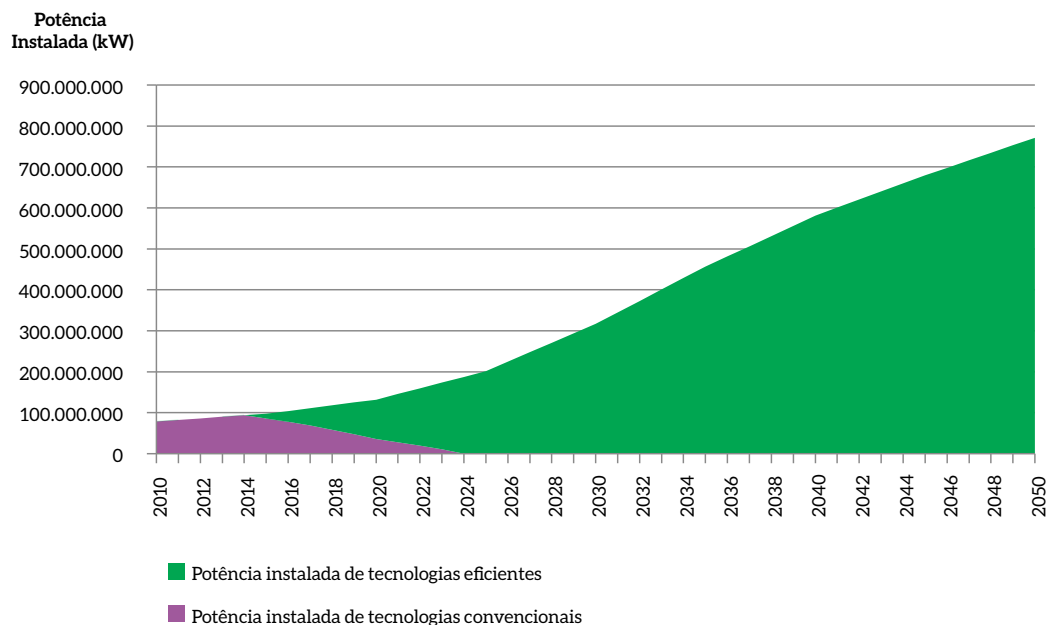


Figura 157 – Projeção de Potência Instalada de Ar-condicionado para o Setor Comercial e Serviços no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

5.5.1.2 RESULTADOS

Utilizando os resultados de potência térmica instalada de ar-condicionado no setor comercial e serviços, calculam-se o consumo de energia para os dois cenários e as emissões de CO₂ evitadas (Figura 158).

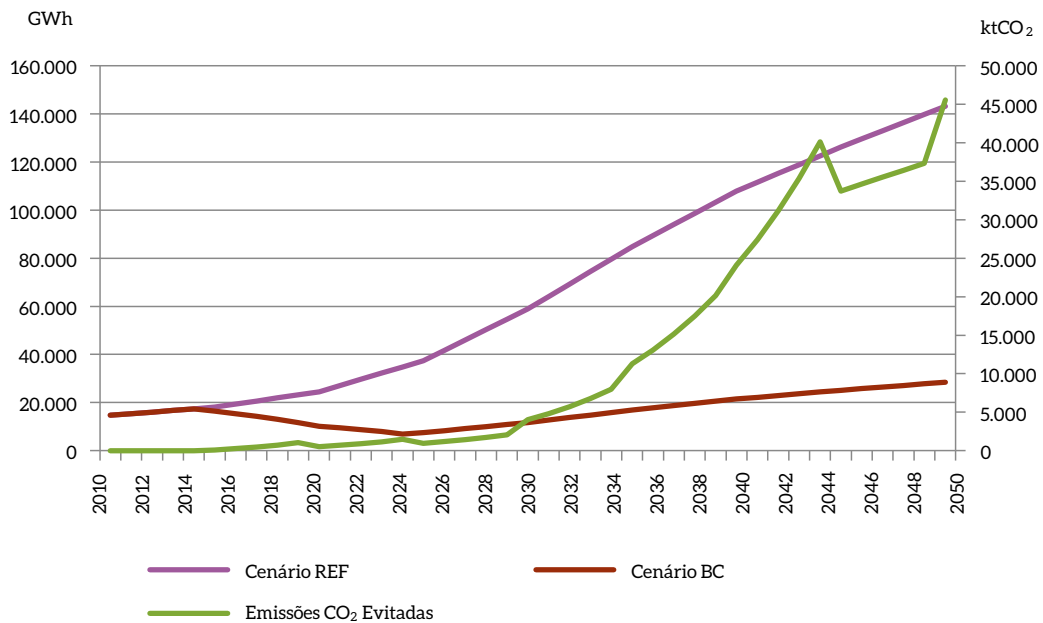


Figura 158 – Energia Consumida e Emissões de CO₂ Evitadas pelos Equipamentos de Ar-condicionado no Setor Comercial e Serviços nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

Com base nos custos dos equipamentos e nos custos de energia, se estimam Capex e Opex para cada cenário (Figura 159 e Figura 160), para os equipamentos de ar-condicionado, no setor comercial e serviços.

Milhões de US\$

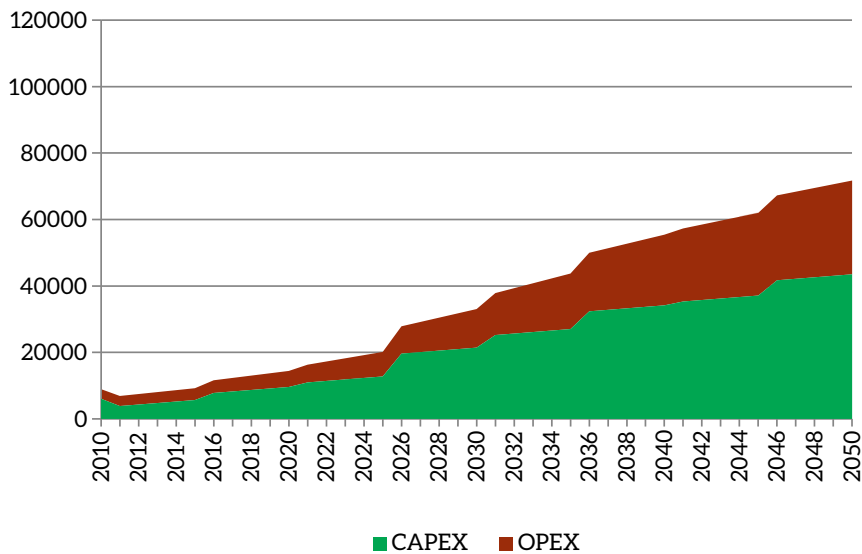


Figura 159 – Capex e Opex do Ar-condicionado a Valor Nominal no Cenário REF no Setor Comercial e Serviços (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Milhões de US\$

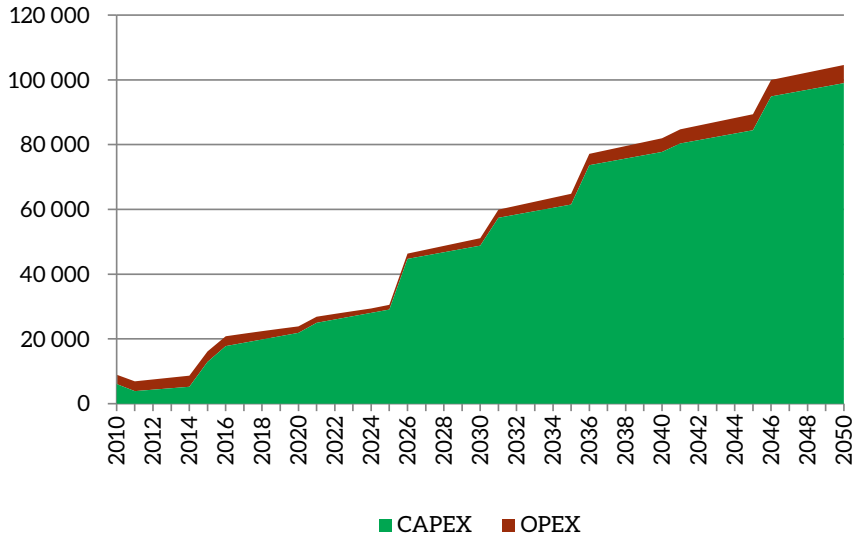


Figura 160 – Capex e Opex do Ar-condicionado a Valor Nominal no Cenário BC no Setor Comercial e Serviços (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Utilizando taxa de desconto de 9,6% ao ano, a implementação do cenário BC para ar-condicionado no setor comercial e serviços representa 179.192 ktep conservados e 503 MtCO₂ evitados.

5.5.2 EFICIENTIZAÇÃO DA ILUMINAÇÃO

5.5.2.1 PREMISSAS

Foi modelado o consumo associado a iluminação pela redução dos tipos de tecnologias empregados a quatro: incandescente, fluorescente compacta, fluorescente tubular e LED.

Ao longo da projeção, foram considerados constantes os parâmetros técnicos e econômicos para incandescente e sua extinção em 2015. Para as demais tecnologias, tanto o desempenho lumínico (expresso em lm/W) quanto o custo específico (em US\$/W) variam ao longo do tempo. No entanto, tais parâmetros são equivalentes para ambos os cenários construídos.

Para o ano-base, são consideradas as seguintes participações por tecnologia, quanto à contribuição para o atendimento do serviço energético:

- 1) Incandescente: 7,7%;
- 2) Fluorescente compacta: 14,7%;
- 3) Fluorescente tubular: 77,6%.

Em 2010, não foi considerada a participação de lâmpadas LED. Quanto à variação da demanda, esta foi estabelecida a partir do ano-base e acompanhando o crescimento da mão de obra empregada no setor, como estimado por Haddad (2015), sendo regionalizada segundo o consumo total das edificações não residenciais obtido a partir de EPE (2015). Na Figura 161, é representada a evolução da demanda de iluminação.

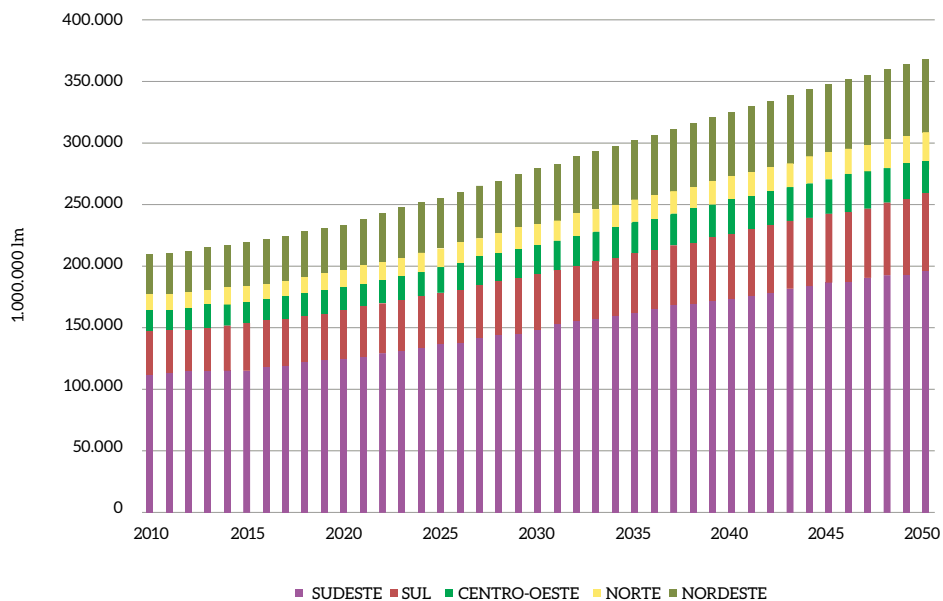


Figura 161 – Demanda de Iluminação (2010-2050 em 1.000.000 lm)

Fonte: Elaboração própria

A diferenciação entre os cenários ocorre pela participação de cada tecnologia no atendimento à demanda, como descrito a seguir.

5.5.2.2 RESULTADOS

No cenário REF, é prevista a penetração de LED de forma mais lenta, sendo que sua participação atinge 50% do total por volta de 2033, substituindo exclusivamente lâmpadas fluorescentes a partir de 2015. No cenário BC, por sua vez, é forçada a permanência de fluorescentes em parcelas fixas a partir de 2040.

No cenário BC, é acelerada a penetração da tecnologia LED, que atenderá 50% do mercado por volta de 2031 (ou seja, 11 anos antes, em comparação ao cenário REF). A Figura 162 ilustra a participação das tecnologias nesse cenário.

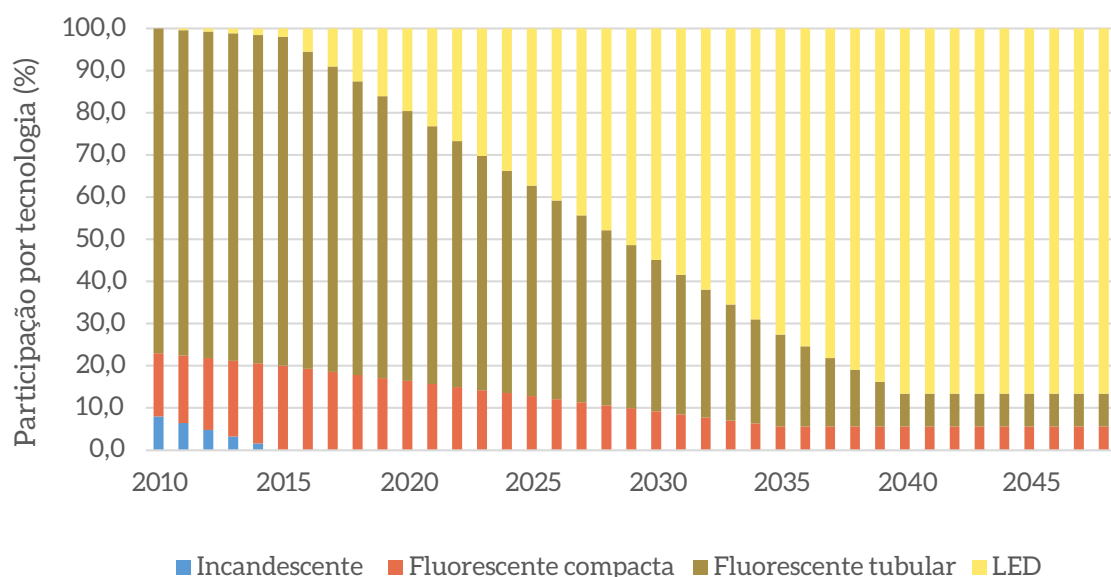


Figura 162 – Participação de Tecnologias de Iluminação no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 163 mostra a evolução do consumo de eletricidade nos dois cenários. Em ambos, pode-se ver que o consumo ao final do período é inferior ao do ano-base, especialmente pela eliminação das lâmpadas incandescentes. Até 2015, o perfil é idêntico e, em 2040, a diferença de consumo é de 23.419 GWh, o que representa redução no consumo de energia de 82% em relação ao cenário REF. Trata-se do efeito da significativa eficiência da iluminação advinda da eliminação de lâmpadas incandescentes e aumento da participação de LED. Durante todo o período, seriam economizados 546 TWh de eletricidade.

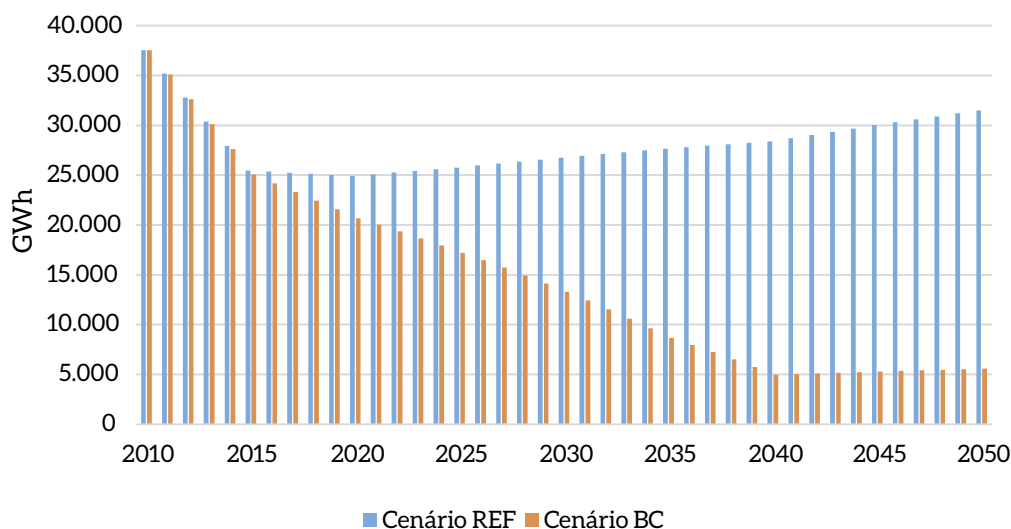


Figura 163 – Consumo de Eletricidade por Iluminação nos Cenários REF e BC (GWh, 2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

O perfil das emissões ao longo do período apresenta variações em função dos fatores de emissão estimados. Em 2040, no cenário BC, seriam emitidas 4,5 MtCO₂ a menos que o projetado no cenário REF. Ao longo do período, as emissões evitadas atingiriam 99 MtCO₂.

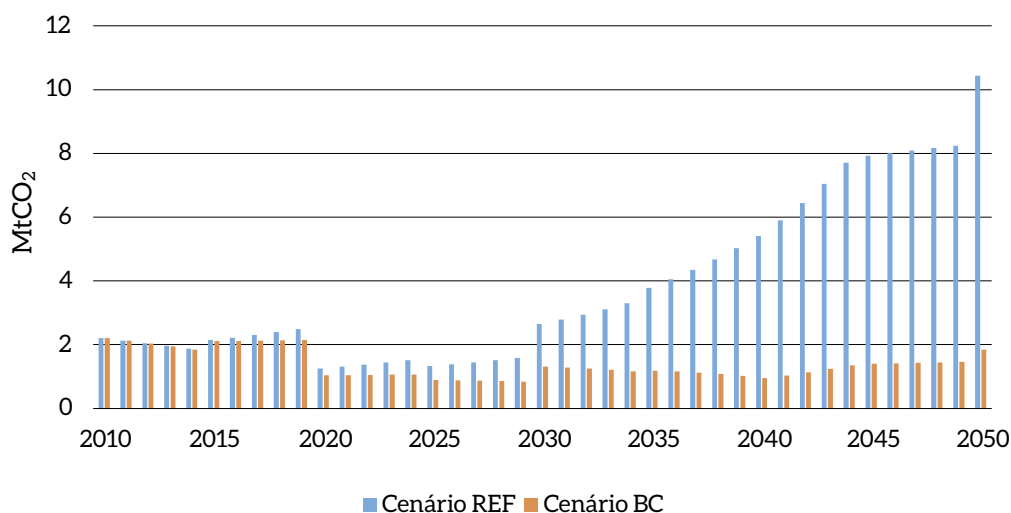


Figura 164 – Emissões da Iluminação nos Cenários REF e BC (MtCO₂, 2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Por fim, deve-se destacar que o custo marginal de abatimento da efficientização da iluminação, com taxa de desconto de 9,6% ao ano, seria negativo de US\$ 263,1/tCO₂, o que demonstra a atividade econômica da medida.

5.5.3 ILUMINAÇÃO PÚBLICA

5.5.3.1 PREMISSAS

A metodologia para construção dos cenários para o consumo de energia e emissões associadas à iluminação pública considera parâmetros definidos em etapa anterior do estudo, especialmente o parque de equipamentos existente no ano-base – reduzido a duas tecnologias (vapor de sódio, vapor metálico) – e com penetração de LED ao longo do horizonte de análise.

A partir de um rendimento médio por tecnologia, é estimada a demanda em termos lumínicos (expressa em lm). É considerado – como parâmetro para crescimento da demanda por iluminação pública – a variação no número de domicílios no Brasil para cada uma das regiões geográficas. A Figura 165 ilustra a demanda por cada região, resultando em crescimento de 64% no período de projeção.

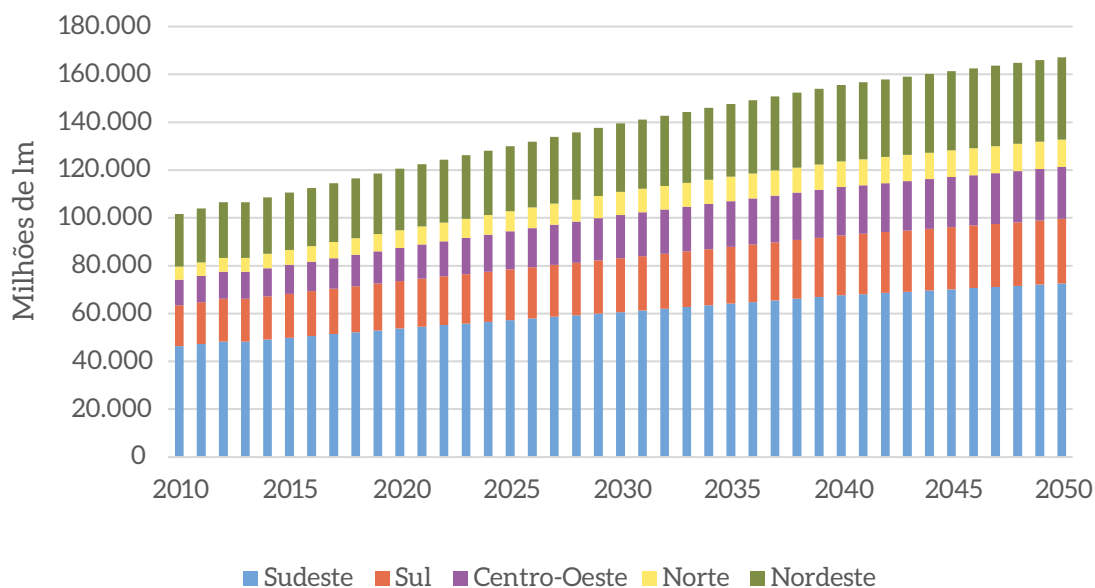


Figura 165 – Demanda em Iluminação Pública por Região (2010-2050 em 1.000.000 lm)

Fonte: Elaboração própria

Em ambos os cenários, os rendimentos e custos para implantação de cada tecnologia são iguais, variando apenas a participação de cada uma delas no parque total.

5.5.3.2 RESULTADOS

No cenário BC, a participação de LED em iluminação pública é acelerada em comparação ao cenário REF, como pode ser visualizado na Figura 166.

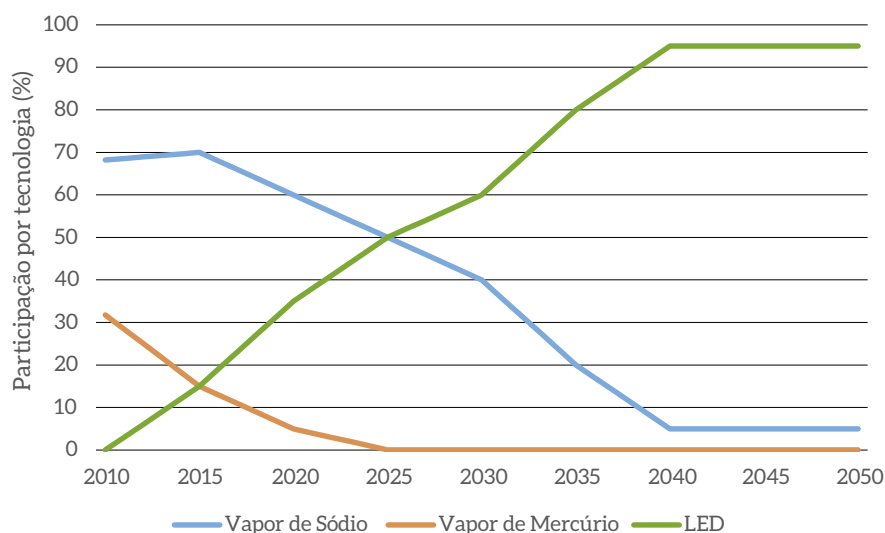


Figura 166 – Participação de Tecnologias em Iluminação Pública no Cenário BC (2010-2050 em %)

Fonte: Elaboração própria

Ainda nesse cenário, o crescimento na participação de vapor de sódio ocorre até 2015 (dez anos antes do cenário REF), sendo decrescente a partir desse ano. A participação de vapor de mercúrio é análoga ao do cenário anterior, mas LED apresenta crescimento até 2040, quando passa a ocupar 95% do parque instalado.

Na Figura 167, são apresentados os resultados esperados para o consumo total de eletricidade em cada um dos cenários. Pode-se ver que, a partir de 2015, o cenário BC apresenta menor consumo – especialmente no período entre 2025 e 2045, em que a diferença na participação de LED é mais acentuada.

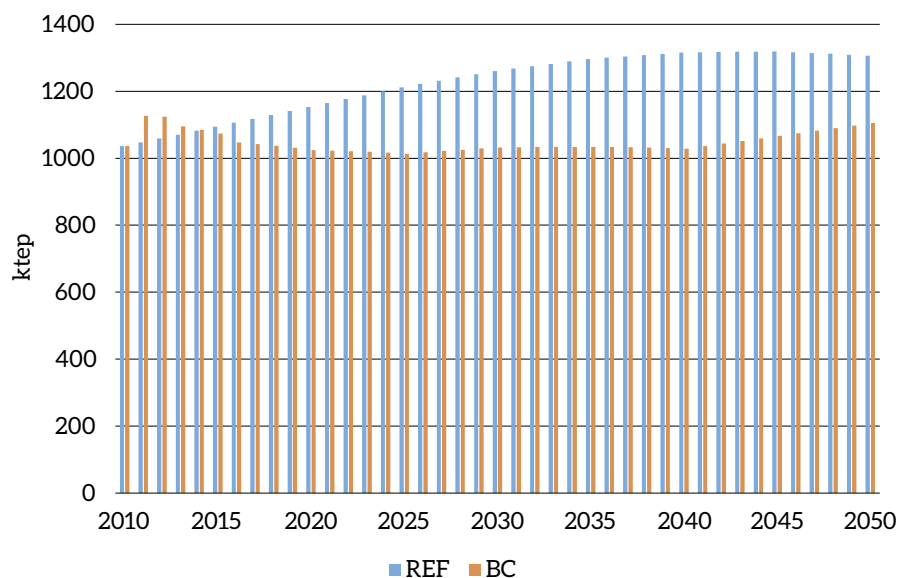


Figura 167 – Consumo por Iluminação Pública nos Cenários REF e BC (2010-2050 em ktep)

Fonte: Elaboração própria

A variação dos fatores de emissão influencia diretamente a estimativa das emissões associadas ao uso de energia, conforme a Figura 168. Dependendo do período, a diferenciação entre os cenários é mais ou menos relevante, mas com tendência de crescimento na mitigação de emissões ao longo do período analisado.

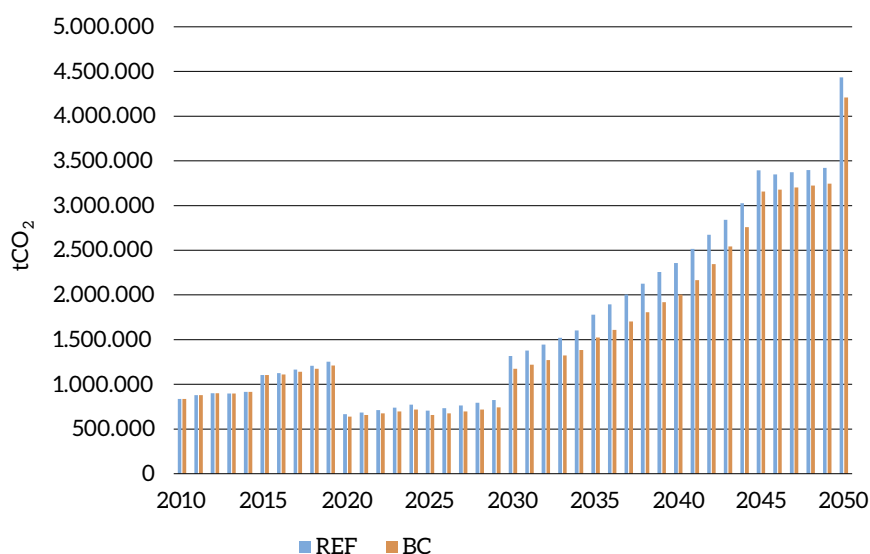


Figura 168 – Emissões Decorrentes de Iluminação Pública nos Cenários REF e BC (2010-2050 em tCO₂)

Fonte: Elaboração própria

Em termos de custos, verifica-se que a implementação da efficientização energética implica gasto adicional, com relação ao cenário REF, de US\$ 5,45 bilhões até 2050, com custo marginal de abatimento de US\$ 2.590/tCO₂.

5.6 PREMISSAS E RESULTADOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Considerou-se, no cenário BC, somente a opção de geração distribuída a partir de painéis fotovoltaicos (FV), pois acredita-se ser esta a tecnologia de maior aptidão para aplicação em edificações no Brasil e com maior potencial para a mitigação de GEE. O emprego de fontes renováveis em meio urbano tem como grande dificuldade o aproveitamento do recurso natural, usualmente prejudicado pela concentração de edificações, como no sombreamento de painéis fotovoltaicos ou enfraquecimento do recurso eólico.

5.6.1 PREMISSAS

No cenário BC, considerou-se o potencial total da tecnologia nos setores residencial e não residencial (comercial e escolas). Para cada potencial, um custo nivelado de energia é mensurado.

A curva de abatimento de emissões para o cenário é também função do ano de entrada do sistema, definido por uma curva de penetração máxima de sistemas fotovoltaicos distribuídos na rede, ano a ano, durante o período de estudo. Por sua vez, o custo de capital é ponderado pelo do ano de entrada

devido ao aprendizado tecnológico considerado para o setor, responsável por reduzir custos ao longo do período. Por fim, o potencial de abatimento relativo a dada capacidade instalada é também função do ano de entrada, uma vez que, para sistemas com entrada disponível próxima ao ano 2050, apenas a energia gerada até esse ano foi considerada, mesmo que o tempo de vida útil desse sistema ultrapasse o fim do período de estudo. Considerou-se o tempo de vida útil do sistema fotovoltaico igual a 25 anos.

Assim como para cálculo do cenário REF, cada região do país foi dividida por disponibilidade do recurso solar por 20 valores de radiação solar (Figura 117). O dado solar e a tarifa de eletricidade estipulada, por região do país, são os principais parâmetros responsáveis por diferenciar os custos de abatimento do setor fotovoltaico em geração distribuída no país.

5.6.2 CUSTO NIVELADO

Para cálculo do custo referente à penetração da tecnologia, considerou-se o preço atualmente praticado no mercado, sendo posteriormente aplicado um aprendizado tecnológico para determinação de seu desenvolvimento. A taxa de aprendizado considerada é de 18% até 2020 e 16% até 2050. Em seguida, esses valores foram convertidos em dólar de 2010, conforme Haddad (2015).

Tabela 88 – Estimativa da Evolução do Custo da Tecnologia* (2015-2050)

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Preço (R\$/Wp)	9,00	7,35	6,84	6,44	6,07	5,82	5,67	5,54
Preço (US\$ ₂₀₁₀ /Wp)	4,15	3,39	3,15	2,97	2,80	2,68	2,61	2,55

Fonte: Elaboração própria a partir de MIRANDA, 2013

O custo anual de operação e manutenção (O&M) considerado é igual a 1% do preço de aquisição do sistema⁵³ (LACCHINI; DOS SANTOS, 2013; MITSCHER; RÜTHER, 2012). Posteriormente, esses valores foram trazidos a valor presente e podem ser calculados, assumindo uma vida útil de 25 anos, a partir da Equação 26.

$$VPC^{O\&M} = \sum_{t=1}^{25} \frac{C^{O\&M}_t}{(1+r)^t} \quad (26)$$

Em que,

$VPC^{O\&M}$: representa o valor presente dos custos de operação e manutenção ao longo da vida útil;

$C^{O\&M}_t$: representa o custo de operação e manutenção no instante t;

r: representa a taxa de desconto.

⁵³ O tempo de vida útil considerado para o sistema fotovoltaico é de 25 anos. Considera-se que o custo referente a uma provável troca de inversor ou outros itens durante esse período já se encontra incluído nos gastos de O&M (FERRARA; PHILIPP, 2012).

O custo de aquisição do sistema fotovoltaico e os custos de operação e manutenção trazidos a valor presente foram posteriormente anualizados pelo método da anuidade equivalente (AE – Equação 27). Esse indicador mostra de que forma seria distribuído o custo (ou renda econômica) do projeto se este fosse uniforme anualmente, a uma dada taxa de desconto (SAMANEZ, 2007). Por fim, a divisão entre o custo anualizado e a geração média anual do sistema tem como resultado o custo nivelado de geração de energia.

$$AE = VPC^{Totais} \cdot \frac{r(1+r)^{25}}{(1+r)^{25} - 1} \quad (27)$$

Em que:

AE: representa o valor da anuidade equivalente;

VPC^{Totais} : representa o valor presente de todos os custos;

r: representa a taxa de desconto.

O custo adicional da energia produzida pela fonte pode ser definido como o valor pago por unidade de energia fotovoltaica em relação ao que seria pago à distribuidora de energia elétrica. Esse valor é obtido pela diferença entre o custo nivelado do sistema (R\$/kWh) e a tarifa de energia elétrica (R\$/kWh). A Figura 169 apresenta os valores projetados.

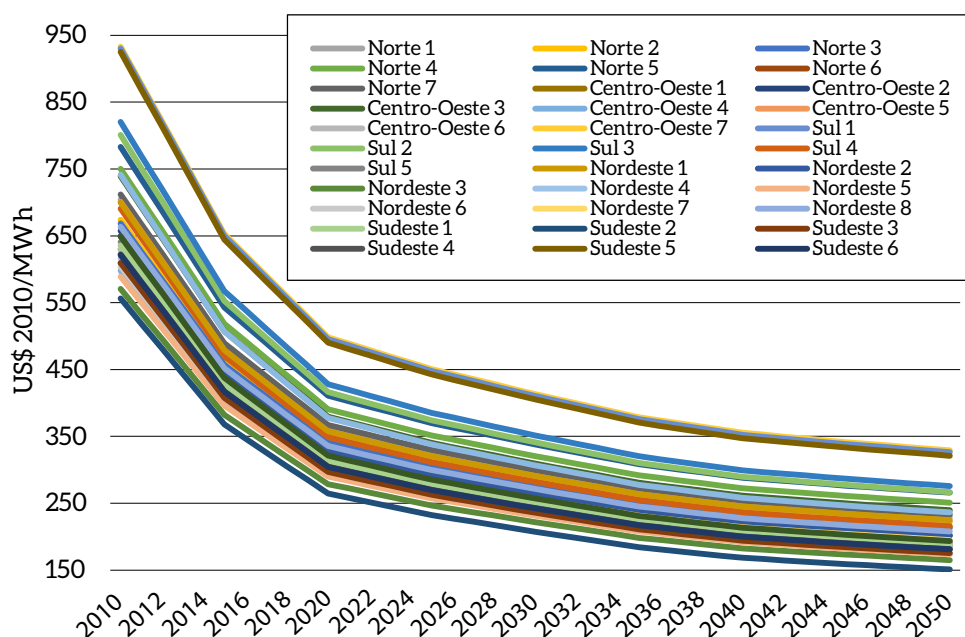


Figura 169 – Custo de Geração Fotovoltaica Adicional em relação ao Custo de Aquisição de Energia junto à Distribuidora, de Entrada do Sistema e Cada um dos Grupos Considerados (2010-2050 em US\$ 2010/MWh)

Fonte: Elaboração própria

Dado que a geração fotovoltaica a partir de sistemas fotovoltaicos não emite GEE,⁵⁴ a unidade de energia gerada pelo sistema evita a emissão de gases referente ao caso no qual essa mesma quantidade de energia fosse gerada pelo *grid* brasileiro.

O potencial de mitigação proveniente de sistemas fotovoltaicos, assim como o respectivo custo de abatimento por tonelada de CO₂, é função do fator de emissão do *grid* durante o período no qual o sistema se encontra em operação. De forma geral, quanto menor o fator de emissão do *grid* (tCO₂/MWh), maior será o custo de abatimento (US\$/tCO₂).

Embora o potencial de abatimento (tCO₂) contabilizado a um sistema fotovoltaico seja ponderado pela variação do fator de emissão do *grid* durante todo o período de estudo, o custo de abatimento (US\$/tCO₂) é definido no ano de entrada do sistema. O custo de abatimento é definido pela Equação 28.

$$\text{Custo de Abatimento} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{tCO}_2} \right) = \text{Custo Geração FV} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{MWh}} \right) \times \text{Inverso Fator Emissão} \left(\frac{\text{MWh}}{\text{tCO}_2} \right) \quad (28)$$

5.6.3 POTENCIAL FOTOVOLTAICO

O potencial fotovoltaico em residências tem como principais parâmetros a disponibilidade de área e o consumo domiciliar de energia, extraído de Miranda (2013) e Miranda et al. (2015). No caso de sistemas alocados em estabelecimento não comerciais, apenas a disponibilidade de telhado foi considerada. De modo a diferenciar o custo em função do ano de entrada do sistema, considerou-se uma curva de aprendizado tecnológico para a tecnologia, assim como feito anteriormente para a linha de base.

Uma curva de penetração máxima foi elaborada de modo a determinar o ano de entrada no qual dado potencial se encontra disponível. Esse aspecto é determinante para cálculo de seu custo de geração, assim como sua capacidade de mitigação durante o período de estudo.

Deve-se destacar que não foram considerados casos de substituição de sistemas obsoletos. Isto é, sistemas com entrada anterior a 2025⁵⁵ têm seu tempo de vida útil finalizado em momento anterior ao fim do período de estudo e, dessa forma, poderiam ser substituídos por novos sistemas. Essa opção, entretanto, não foi considerada.

⁵⁴ A emissão de sistemas fotovoltaicos se refere apenas à operação do sistema e, nesse caso, tem valor igual a zero. A emissão referente à fase de fabricação dos componentes do sistema deve ser considerada no setor industrial ou atribuída a outro país para o caso de itens importados.

⁵⁵ O tempo de vida útil considerado para o sistema fotovoltaico é de 25 anos.

5.6.3.1 SETOR RESIDENCIAL

O potencial fotovoltaico do setor residencial brasileiro foi obtido de Miranda (2013). Assim como na linha de base, o potencial é calculado para cada região do país e fonte de dado de radiação solar, tal como apresentado na Tabela 89. Uma disponibilidade de telhado foi associada a cada grupo, assim como potencial máximo por domicílio ponderado pelo respectivo consumo de eletricidade.

O maior potencial se encontra na região Sudeste, com 11,4 GWp em 2015, enquanto o menor é observado na região Norte, com 1,3 GWp para o mesmo ano (Tabela 89).

Tabela 89 – Potencial do Setor Residencial Brasileiro por Região (2015-2050)

Potencial – capacidade (MWp)								
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Norte	1.312,78	1.476,63	1.639,80	1.799,35	1.968,77	2.153,12	2.354,68	2.575,70
Nordeste	4.076,84	4.441,42	4.799,51	5.145,87	5.507,30	5.893,26	6.307,04	6.751,63
Centro-Oeste	2.009,51	2.242,67	2.472,09	2.693,86	2.923,26	3.171,19	3.439,56	3.730,93
Sudeste	11.484,76	20.702,52	22.553,95	24.378,69	26.297,12	28.353,30	30.565,66	32.951,65
Sul	5.896,48	6.498,35	7.101,28	7.695,71	8.321,76	8.678,29	8.876,69	9.100,40
Brasil	24.780,36	35.361,59	38.566,63	41.713,49	45.018,21	48.249,16	51.543,62	55.110,31

Fonte: Elaboração própria

5.6.3.2 DEMAIS SETORES

A estimativa do potencial para os demais segmentos de edificações é bastante complexa, dada sua grande heterogeneidade. Devido à grande dificuldade em indicar estabelecimentos padrão com características bem delimitadas e representativas a um grupo não residencial, optou-se por calcular o potencial apenas daqueles de menor heterogeneidade, como, no caso, *shoppings*, hipermercados e escolas. De posse da área total nesses setores por região do país, um coeficiente de corte foi aplicado de modo a determinar a área disponível para aplicação fotovoltaica. Para efeito de cálculo, considerou-se um módulo básico de 220 Wp, com 1,42 m².

Tendo como base a área bruta locável total de *shoppings* (ABL), considerou-se que 5% desse volume, por região do país, estariam disponíveis para aplicações fotovoltaicas (ABRASCE, 2015a). O maior potencial se localiza no estado de São Paulo, com disponibilidade, já aplicada a redução mencionada, de cerca de 505 mil m², distribuídos em 178 *shoppings* em operação. O menor potencial encontra-se no Amapá, com pouco menos de 4 mil m². O potencial de aplicação de sistemas fotovoltaicos em *shoppings* pode ser observado no anexo deste estudo.

Para hipermercados, dado que usualmente não se encontram em *shoppings* ou no térreo de edificações, considerou-se um coeficiente de redução de 50% também em relação à área bruta locável desse setor. Como não foram encontrados dados discriminados por região do país, utilizou-se a participação regional encontrada em *shoppings* para ponderação.

Em edificações educacionais, considerou-se uma área média por tipo de estabelecimento (Tabela 90). Em seguida, fez-se o produto desses valores com a quantidade de estabelecimentos, por tipo, encontrada em Inep (2015). Em seguida, utilizou-se um coeficiente de redução de 10% sobre a área encontrada para determinação da área disponível para aplicações fotovoltaicas. O potencial total encontrado em escolas é de 17,3 GWp.

Tabela 90 – Área Média por Tipo de Estabelecimento Educacional

Categoria	Área média (m ²)
Educação Básica	480
Educação Infantil	480
Ensino Fundamental	480
Ensino Médio	3.000
Educação Especial	1.000
Educação Jovens e Adultos	1.000
Educação Profissional	1.000

Fonte: INEP, 2015

5.6.4 PENETRAÇÃO MÁXIMA DE PAINÉIS

Para quantificação do potencial total no cenário BC, descontou-se a potência instalada considerada na linha de base do potencial projetado para os setores residencial e não residencial. Já subtraída a linha de base (Figura 118), o potencial total encontrado para o cenário BC é de aproximadamente 66 GWp, com 55,5 GWp alocados no setor residencial e 14,5 GWp no setor não residencial. Desse total, 35 GWp se encontram na região Sudeste.

Entretanto, em função de aspectos como oferta de equipamentos e disponibilidade de mão de obra, uma taxa de penetração máxima anual foi determinada (Figura 170). A medida resguarda os resultados de uma situação irreal em que todo o potencial seja aproveitado em um único instante no tempo. Isto é, mesmo que haja disposição a pagar por todo o potencial da medida fotovoltaica, essa penetração deve seguir uma taxa máxima de penetração anual ao longo do período em função de restrições que fogem ao controle do agente privado individual.

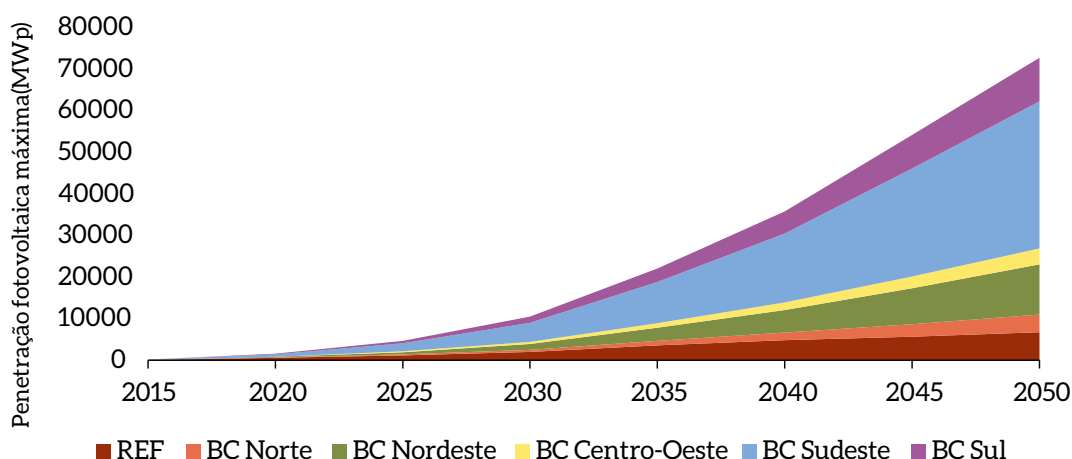


Figura 170 – Penetração Fotovoltaica Máxima Acumulada (2015-2050 em MWp)

Fonte: Elaboração própria

A partir da curva de penetração máxima, determinou-se a capacidade adicional máxima permitida, ano a ano, durante o período do estudo, por grupo de estudo considerado entre as regiões do país. O ano de entrada em que dada capacidade fotovoltaica (MWp) se encontra disponível é utilizado para determinar o custo nivelado do respectivo potencial, em última análise, o custo de abatimento em função desse potencial fotovoltaico específico. Portanto, a curva de penetração máxima elaborada indica não somente o custo inerente a dado potencial, mas também o momento em que esse potencial se encontra disponível para fins de mitigação. O potencial total de abatimento referente a uma capacidade instalada é função de sua geração total, contada a partir do ano de entrada até 2050. Sendo assim, mesmo que o tempo de vida útil do sistema ultrapasse o fim do período (sistemas com entrada após 2025), apenas a energia gerada até 2050 é contabilizada.

5.6.5 CUSTO DE ABATIMENTO

A curva de custo de abatimento possibilita observar o potencial de abatimento de CO_2 para sistemas fotovoltaicos distribuídos na rede e seu respectivo custo por tCO_2 mitigada. Uma vez que a curva de custo de abatimento do setor teve como base a curva de penetração máxima apresentada anteriormente, oito curvas foram elaboradas de modo a representar o potencial da capacidade instalada com entrada no período 2015-2050, em intervalos de cinco anos. A curva indica o potencial de abatimento para sistemas com entrada disponível para dado ano em todo o período de estudo.

É interessante notar que as medidas de maior custo se devem a potenciais localizados em áreas com recurso solar de menor qualidade, como Curitiba. De forma análoga, os potenciais de menor custo se encontram em áreas de excelente recurso solar, como Bom Jesus da Lapa e Petrolina.

O custo de abatimento proveniente de sistemas fotovoltaicos é sensível à variação do fator de emissão (tCO_2/MWh) do grid brasileiro. Outro parâmetro balizador do custo é o aprendizado tecnológico

da fonte, de forma geral, responsável por reduzir os custos ao longo do tempo, porém com menor influência sobre o resultado final. Assim, o custo de abatimento tem variação inversa em relação ao fator de emissão do *grid*, adicionado de tendência de redução anual em função da taxa de aprendizado da tecnologia.

A dinâmica de variação dos fatores de emissão do *grid* brasileiro tem também ingerência na capacidade de mitigação total durante todo o período de estudo. De forma geral, sistemas com entrada anterior a 2025 têm maior potencial de mitigação, pois geram energia durante 25 anos. A partir desse ano, sistemas entrantes contribuem durante o período que vai desde seu ano de entrada até 2050, reduzindo a taxa de mitigação por capacidade instalada (Figura 171).

Dentre os sistemas com entrada anterior a 2025, quanto mais tardia for a integração ao *grid*, maior é seu potencial de mitigação. Isso ocorre porque esses sistemas se encontrarão em operação nos últimos dez anos do período de estudo, intervalo no qual o fator de emissão de *grid* apresenta taxa grande de crescimento. Isso é uma limitação da abordagem adotada neste estudo, em que se faz uma análise para um intervalo determinado, o que implica limitação do potencial ao período de estudo.

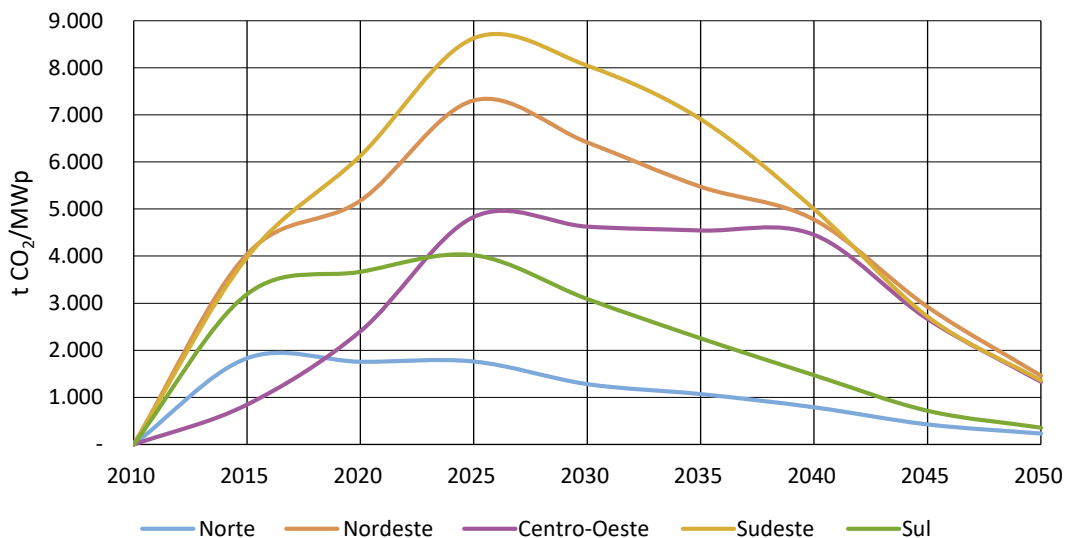


Figura 171 – Potencial de Abatimento por Capacidade Instalada em função do Ano de Entrada (2015-2050)

Fonte: Elaboração própria

A curva de abatimento com a medida fotovoltaica indica o potencial total de mitigação de CO₂ durante todo o período de estudo para sistemas com entrada em um dado ano. Por exemplo, caso todo o potencial fotovoltaico disponível em 2015 fosse empregado para mitigação de GEE, mitigar-se-ia cerca de 290 mil tCO₂, que variaria, por região, de US\$ 2.600/tCO₂ a US\$ 15.300/tCO₂ (Figura 172). De forma geral, tem-se menor custo em locais com boa disponibilidade do recurso solar e alto fator de emissão do *grid*.

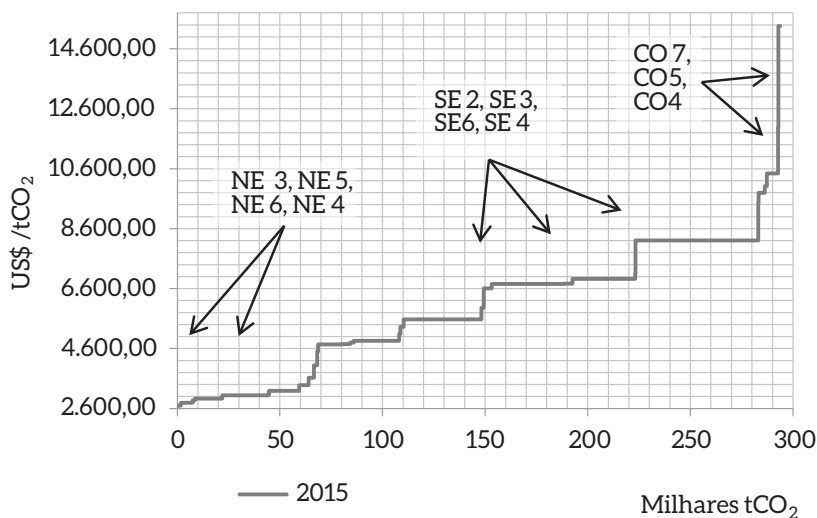


Figura 172 – Curva de Custo de Abatimento para Medida Fotovoltaica (2015)

Fonte: Elaboração própria

Contabilizando-se todo o potencial fotovoltaico estimado para o país, com a entrada distribuída ao longo de todo o período de estudo (até 2050), tem-se um potencial total de mitigação de 219 MtCO₂ com custos marginais que variariam de US\$ 1.663/tCO₂ até US\$ 10.199/tCO₂. Deve-se destacar que esses custos não se encontram a valor presente, mas, sim, com vigência no momento de disponibilidade do respectivo potencial.

5.7 RESULTADOS CONSOLIDADOS

A Figura 173 apresenta o consumo de energia no cenário REF, o consumo de energia caso todas as medidas de baixo carbono fossem adotadas concomitantemente, assim como as respectivas emissões evitadas. A implementação conjunta de todas as medidas de baixo carbono levaria a uma redução de 42% no consumo energético no setor de edificações brasileiro em 2050. As emissões evitadas acumuladas até 2050 alcançariam 1,23 bilhão de tCO₂.

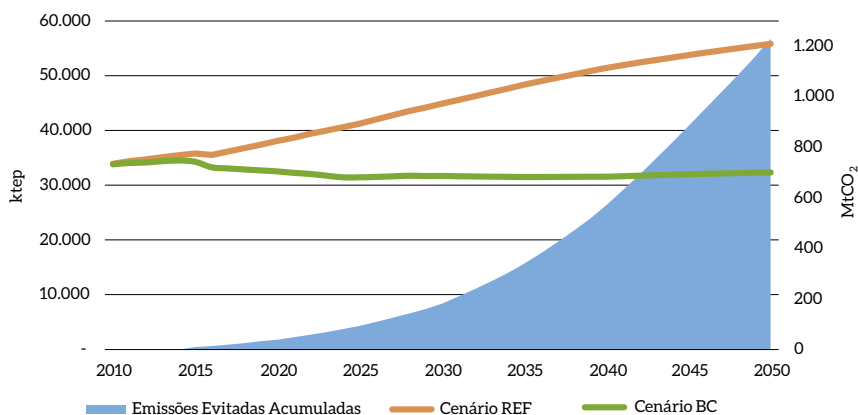


Figura 173 – Consumo de Energia e Emissões Evitadas Acumuladas

Fonte: Elaboração própria

Os resultados de custos e potenciais de abatimento de GEE no setor de edificações brasileiro, por uso final de energia e para geração distribuída, foram agregados em uma curva de custo marginal de abatimento (CMA). Tal curva elenca as opções de mitigação por ordem crescente de custo, considerando seus respectivos potenciais.

Os resultados mostram que cerca de 28% do potencial técnico de abatimento de 1.230 MtCO₂, entre 2015 e 2050, têm custo de abatimento negativo ou próximo de zero (Figura 174). Por outro lado, as demais medidas têm custos de abatimento extremamente altos, acima de 200 US\$/tCO₂.

A polaridade de resultados – custos muito baixos ou muito altos – se dá por diversos motivos, dentre os quais se destaca o baixo fator de emissão do *grid*, que faz que um MWh elétrico evitado por uma medida de mitigação gere uma pequena quantidade de CO₂ abatido. Apesar das limitações, a curva de custo marginal de abatimento (CMA) é uma boa ilustração dos custos e potenciais de abatimento em determinado setor.

Tabela 91 – Potencial, Custo Marginal e Total de Abatimento das Medidas de Mitigação Aplicáveis ao Setor de Edificações

Legenda	Medida de mitigação (Setor)	Potencial total de mitigação (MtCO ₂)	Custo marginal de abatimento (US\$/tCO ₂)
1	Eficientização de fogões a GN (residencial)	44	-488
2	Iluminação da iluminação (comercial e serviços)	99	-263
3	Eficientização de aquecedores a GN (residencial)	7	-36
4	Eficientização de fogões GLP (residencial)	201	-10
5	Eficientização de chuveiros elétricos (residencial)	3	218
6	GD a partir de painéis FV – região Nordeste (residencial, comercial e serviços)	44	1.633
7	Substituição de chuveiros elétricos por SAS (residencial)	4	1.933
8	GD a partir de painéis FV – região Sudeste (residencial, comercial e serviços)	145	2.092
9	Eficientização da iluminação (público)	6	2.590
10	Eficientização da iluminação (residencial)	15	2.655
11	GD a partir de painéis FV – região Sul (residencial, comercial e serviços)	15	2.908
12	Eficientização de <i>freezers</i> (residencial)	15	2.974

Legenda	Medida de mitigação (Setor)	Potencial total de mitigação (MtCO ₂)	Custo marginal de abatimento (US\$/tCO ₂)
13	Eficientização da climatização (comercial e serviços)	483	3.206
14	Eficientização das geladeiras (residencial)	96	5.668
15	Eficientização da climatização (residencial)	38	6.200
16	GD a partir de painéis FV – região Norte (residencial, comercial e serviços)	3	7.120
17	GD a partir de painéis FV – região Centro-Oeste (residencial, comercial e serviços)	12	10.199
	Total	1.230	-

Fonte: Elaboração própria

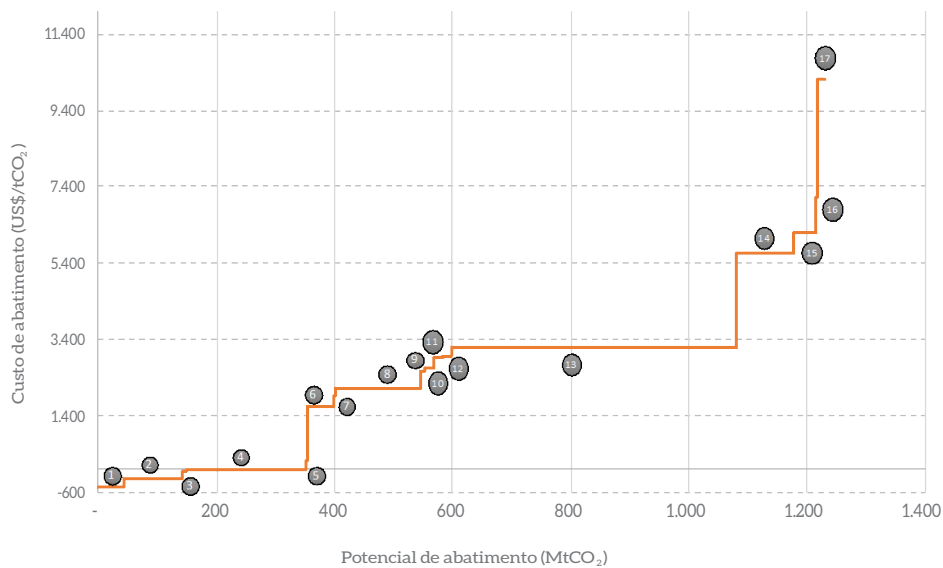


Figura 174 – Curva de Custo Marginal de Abatimento do Setor de Edificações

Fonte: Elaboração própria

A medida de maior potencial é a efficientização da climatização comercial, que corresponde a cerca de 39% do potencial total de abatimento no setor de edificações. Além da efficientização da climatização comercial e da expansão da geração distribuída fotovoltaica, que também apresenta significativo potencial de abatimento na região Sudeste (12%), as medidas de maior potencial de abatimento são aquelas que substituem diretamente combustíveis fósseis (gás natural e GLP). Em especial, a efficientização de fogões a GLP no setor residencial tem grande potencial para mitigação (16%), visto que seu fator de emissão é superior ao do gás natural e que o GLP é o combustível mais consumido para cocção no setor residencial.

Cabe ressaltar que os valores de custo de abatimento dependem das premissas de taxa de desconto adotadas na análise. Valores altos como os utilizados no setor residencial reduzem a atratividade dessas medidas.

A análise feita aqui foi realizada em termos de energia (média) e não potência. Não foram consideradas variações sazonais, ou mesmo alterações no perfil de consumo de eletricidade ao longo do dia. No caso do setor elétrico, há questões relacionadas ao atendimento da demanda de pico, em que a capacidade de geração do sistema está próxima de seu máximo. Da mesma forma, no pico de demanda, as opções de geração mais caras, em geral fósseis, são mais utilizadas, o que significa que tanto o fator de emissão quanto o custo da eletricidade para o sistema nesses momentos são maiores. Uma análise comparando ao custo da eletricidade na ponta (e não na média) pode ser interessante nesse sentido. Para tanto, contudo, é necessário um modelo integrado que leve em consideração não apenas a expansão do sistema, mas também a operação.

A despeito dos altos custos de abatimento, uma vantagem das medidas de mitigação no setor de edificações é que elas são adotadas de forma descentralizada. Isso significa que os volumes de investimentos são espalhados por um grande número de agentes. A descentralização dos investimentos, assim como sua modularidade, são elementos atraentes quando comparados a grandes investimentos em infraestrutura.

Cumprir enfatizar que se trata de uma visão setorial, a qual desconsidera a possível não aditividade das medidas. Por exemplo, ganhos de eficiência elétrica podem ter custo de abatimento ainda maior caso haja mudança concomitante, reduzindo a intensidade de carbono na geração elétrica. Somente uma modelagem integrada permite avaliar o real custo de abatimento de medidas de mitigação, em especial as relacionadas a emissões indiretas, dada a interconexão do setor energético.

Perante fragilidades da avaliação setorial dos potenciais e custos de abatimento, conforme exemplo citado, o projeto adota uma estratégia de integração dos cenários. Para a consecução desse objetivo, uma etapa fundamental que permitiu a construção da curva de custo marginal de abatimento (CCMA) foi a obtenção dos parâmetros técnico-econômicos de tecnologias e processos considerados para o setor de edificações em seus cenários REF e BC. Esses dados servirão de *input* para o modelo de otimização energética MSB8000, que tem como objetivo atender a demanda energética a mínimo custo. Nesse modelo, serão construídos cenários REF e BC de oferta e demanda de energia, com emissões de GEE resultantes, que integrarão os segmentos de edificações aos setores energético, industrial, transporte, Afolu e de gestão de resíduos. Nesse caso, as opções de mitigação de emissões serão avaliadas em termos da sua competitividade intersetorial, o que permitirá obter estimativas reais dos potenciais e custos de abatimento de emissões do setor.

Diante dessas considerações, deve-se enfatizar que a construção de cenários de emissão de GEE do setor de edificações objetivou, essencialmente, a obtenção e consolidação de parâmetros técnico-econômicos com vistas a alimentar o modelo MSB8000. Portanto, a mensuração de custos e potenciais de mitigação, consolidados segundo diferentes óticas de taxa de desconto nas CCMA, objetiva apenas: i) reportar o potencial e os custos de abatimento para fins de comparação com outros estudos com escopo setorial (DE GOUVELLO et al., 2010); ii) enfatizar, mediante a comparação com os resultados advindos da modelagem integrada dos cenários, a importância da estratégia metodológica adotada pelo projeto.



Cenário de baixo carbono com inovação

Capítulo

6

6 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO

O cenário BC+I discute a possibilidade de inserção de inovações no setor de edificações com vistas à mitigação de emissões de GEE. Trata-se de avaliar, adicionalmente ao cenário BC, a possibilidade e os impactos da inserção do conceito de edificações sem consumo de energia da rede, conhecido como ZEB.

Na seção 6.1, será introduzido e discutido o conceito de inovação e, na seção 6.2, serão debatidos os desafios da inovação no setor de edificações. Na seção 6.3, serão apresentadas as estratégias de aplicação do conceito. Por fim, nas seções 6.4 e 6.5, apresentar-se-ão premissas e resultados para o cenário BC+I.

6.1 CONCEITO DE INOVAÇÃO

A dinâmica econômica atual exige que as empresas explorem suas vantagens competitivas em face da concorrência. Segundo Schumpeter (1997), não necessariamente, as inovações aparecem para dar resposta a uma demanda específica dos consumidores. A mudança econômica é propiciada pelo produtor, que educa os consumidores, se for o caso, a querer coisas novas, que diferem em um aspecto ou outro daquelas que tinham o hábito de usar. Nesse sentido, o produtor combina materiais e forças no intuito de produzir outras coisas ou as mesmas coisas com um método diferente.

Schumpeter (1997) considera que a inovação que leva ao desenvolvimento econômico não é apenas aquela que leva em consideração aperfeiçoamentos de um bem ou processo já existente; pelo contrário, o desenvolvimento se alcança quando novas combinações são realizadas em forma descontínua. Nesse sentido, Schumpeter (1997) define cinco casos de inovação que podem levar ao desenvolvimento: i) introdução de um novo bem ou de uma nova qualidade do bem; ii) introdução de um novo método de produção; iii) abertura de um novo mercado; iv) conquista de uma nova fonte de insumos para a produção; e v) entrada de uma nova organização de qualquer indústria.

No caso particular do setor de edificações, a inovação refere-se principalmente à introdução de um novo bem ou uma nova qualidade de um bem. Por exemplo, tecnologias de iluminação como OLED e PLED, que serão apresentadas adiante, constituem-se como novos bens que vão atender a necessidade de iluminação em edificações com alto desempenho. Novas qualidades de bens podem ser encontradas no caso de aprimoramento das tecnologias, como o acréscimo de eficiência em painéis solares fotovoltaicos com materiais de segunda e terceira geração, assim como a tecnologia de pilha combustível para armazenamento de energia.

Em seguida, se apresentam tecnologias e aprimoramentos variados que se enquadram no cenário BC+I do setor. Essas tecnologias inovadoras são consideradas como tal no sentido de que se espera que algumas delas, assim como aquelas que estão em etapa inicial de desenvolvimento, encontrem utilidade prática nas edificações nacionais.

6.2 DESAFIOS DO SETOR DE EDIFICAÇÕES

No contexto dos desafios globais relacionados com as mudanças climáticas e a escassez de recursos, a redução da dependência do setor de edificações na oferta de energia externa é uma importante opção de mitigação. Nesse contexto, têm-se desenvolvido vários estudos associados com *on-site generation* e *energy-saving technologies* (KYLILI; FOKAIDES, 2015; DENG et al., 2014), sendo que a integração desses dois conceitos conhece-se na literatura como ZEB.

Embora não exista uma definição padronizada de ZEB, podem-se encontrar várias iniciativas que visam à promoção desse conceito. Por exemplo, na Europa, a Directive on Energy Performance of Buildings (EPBD) especifica que, em 2020, todas as novas edificações deveriam ser ZEB. Nos Estados Unidos, o Building Technological Program estabelece como objetivo estratégico que as residências deveriam ser *energy zero* em 2020, enquanto as edificações comerciais deveriam atingir esse objetivo em 2025. Por sua vez, no Reino Unido, colocou-se como política que as novas residências deveriam ser *energy zero* em 2016 (SARTORI et al., 2012; SUN et al., 2015; FERRARA et al., 2014).

Nesse sentido, considera-se ZEB uma solução integral para gerir problemas relacionados com economia da energia, segurança energética (confiabilidade, acessibilidade e disponibilidade), proteção ambiental, redução de emissões de CO₂ e poluição de ar no setor de edificações (DENG et al., 2014).

Tal como mencionado, ZEB não tem uma definição padronizada. Há diversas definições ao redor do mundo (TORCELLINI et al., 2006; KILKIS, 2007; LAUSTSEN, 2008; DENG et al., 2014). Por exemplo, de acordo com Hermelink (2014), 71 definições de *nearly zero energy buildings* (nZEB) podem ser encontradas em 17 países da União Europeia e em dois fora desta. Mais do que isso, não apenas existem definições de ZEB, e, sim, se cita *net zero energy buildings* – NZEB e nZEB.

Porém, no intuito de superar a dificuldade de ter uma clara definição, a EPBD definiu nZEB como: “Edificação com um alto desempenho energético. As quase nulas ou muito baixas quantidades de energia necessária devem ser cobertas de forma significativa por fontes renováveis, incluindo a energia renovável produzida no local ou nas proximidades” (EC, 2013, p.18, tradução própria).

Não é objetivo deste relatório discorrer sobre os problemas conceituais de ZEB. Porém, deve-se dizer que, além dos elementos considerados, *on-site generation* e *energy-saving technologies*, é preciso levar em consideração, sobretudo para as novas edificações, o conceito de inovação em si mesmo. Nesse sentido, uma edificação com alto desempenho energético deve considerar desde a perspectiva da demanda, estratégias de *design* passivo, como envoltório, orientação, parâmetros geométricos, entre outros; estratégias ativas, como tecnologias eficientes para aquecimento, ventilação e ar-condicionado, aquecimento de água e iluminação, assim como iniciativas de *demand side managment* – DSM.

Pelo lado da oferta de uma edificação de alto desempenho energético, deve-se pensar na instalação de *on-site generation* com energias renováveis. A Figura 175 apresenta os elementos básicos de uma edificação com alto desempenho energético, assim como o balanço entre oferta (*on-site*) e demanda de energia.

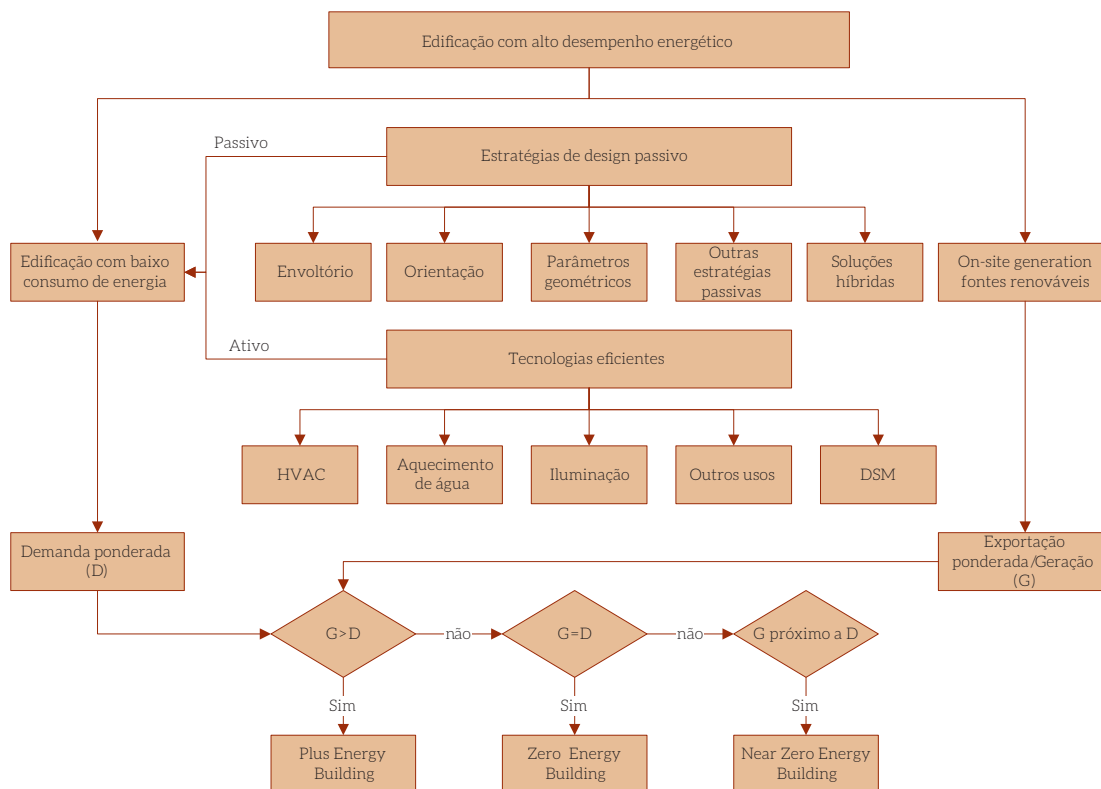


Figura 175 – Elementos de uma Edificação com Alto Desempenho Energético

Fonte: Adaptado de RODRÍGUEZ-UBINAS et al., 2014a

A seguir, serão detalhadamente descritos os elementos de uma edificação com alto desempenho energético.

6.3 EDIFICAÇÃO COM ALTO DESEMPENHO ENERGÉTICO

6.3.1 ESTRATÉGIAS PASSIVAS

6.3.1.1 ENVOLTÓRIO DA EDIFICAÇÃO

A importância do envoltório das edificações não pode ser subestimada. Segundo IEA (2013b), os usos aquecimento e resfriamento contabilizam quase 30% da energia consumida nas edificações, chegando a ser quase 50% nos países de clima frio. Considerando apenas o segmento residencial, a percentagem do consumo de energia para esses usos é cerca de 60% nos países de clima frio.

O envoltório da edificação representa a fronteira entre a parte condicionada da edificação e o ar livre. A adequada escolha do envoltório é uma das mais efetivas formas de reduzir os consumos para o conforto térmico (RODRÍGUEZ-UBINAS et al., 2014a). A característica mais relevante ao avaliar o envoltório é a transmitância térmica (Valor-U), medida em W/m^2K .⁵⁶

Além disso, deve-se levar em consideração que o envoltório das edificações tem por objetivo principal proteger os ocupantes das edificações, assim como lhes oferecer abrigo, sendo que as funções são oferecer segurança, proteção do fogo, privacidade, conforto e abrigo das condições climáticas, estética, ventilação, entre outras (IEA, 2013a). Nesse sentido, o desafio está na otimização do *design* da construção e do envoltório da edificação, objetivando atender as necessidades dos seus ocupantes ao mesmo tempo em que reduz o consumo de energia.

A minimização da demanda de energia para os usos aquecimento e resfriamento requer uma visão integrada desde o projeto de construção de uma edificação. A luz solar é livre e, nesse sentido, devem-se maximizar seus benefícios para reduzir as necessidades por conforto térmico e iluminação mediante um *design* integrado. Isolamento, sombreamento, superfícies reflexivas térmicas e ventilação natural podem ajudar a minimizar os ganhos de calor no verão e, portanto, as necessidades para resfriamento. Outro exemplo é a inovação em janelas dinâmicas, que permitiria aquecimento passivo no inverno e sombreamento no verão, uma vez que a tecnologia se torne economicamente viável.

De forma geral, a seleção de tecnologias para o envoltório deve analisar o tipo de economia, clima (aquecimento o resfriamento dominante) e se é uma nova construção ou *retrofit* (IEA, 2013a; IEA, 2013b).

56 Representa uma razão entre a diferença de temperaturas através de um isolante térmico e o fluxo de calor ou – dito de outra forma – a taxa de transferência de calor (W) em 1 m² de uma estrutura dividida pela diferença em temperatura através da estrutura.

Quadro 4 – Tecnologias de Envolvimento da Edificação de acordo com Economia, Clima e Tipo de Construção

Tipo de economia	Clima	Tecnologia	
		Nova construção	Retrofit
		Isolamento, arejamento e vidros duplos e de controle solar baixo-emissivos (low-E) nas janelas em todas as edificações	
Desenvolvida	Quente	• Sombreamento • Janelas com muito baixo SHGC (ou janelas dinâmicas) • Paredes e telhados com revestimento reflexivo • Telhados avançados (design integrado/BIPV) • Otimização da ventilação natural/mecânica	• Janela exterior com sombreamento e vidros dinâmicos • Materiais de cobertura e revestimentos reflexivos • Paredes com revestimento reflexivo • Película de revestimento nas janelas com menor SHGC • Novas janelas com baixo SHGC
	Frio	• Janelas altamente isoladas • Ganho de aquecimento passivo (qualidade arquitetônica/janelas dinâmicas) • Desempenho equivalente a Programa <i>Passivhaus</i>¹ com base nas limitações de LCC	• Janelas altamente isoladas • Isolamento para sombreamento/ películas de revestimento (low-E) • Sistemas de isolamento das paredes externas • Isolamento interior de alto desempenho
Em desenvolvimento	Quente	• <i>Design</i> arquitetônico de sombreamento exterior • Baixo SHGC das janelas • Paredes e telhados com revestimento reflexivo • Otimização da ventilação natural/mecânica	• Sombreamento exterior • Paredes e telhados com revestimento reflexivo • Películas para revestimento de vidros de baixo custo • Ventilação natural
	Frio	• Janelas altamente isoladas (com a possibilidade de duplo vidro com controle para tempestade) • Ganho de aquecimento passivo (qualidade arquitetônica) • Otimização de mínimo custo para isolamento e arejamento	• Painéis interiores • Isolamento com películas de revestimento low-e • Sistema de isolamento com paredes externas • Isolamento de interiores a baixo custo (ex. poliestireno expandido)

Nota: SHGC: ganho de calor solar; BIPV: energia solar fotovoltaica integrada em edificações; LCC: custo de ciclo de vida

Fonte: IEA, 2013a

De maneira geral, a seleção da tecnologia para o envoltório da edificação deve levar em consideração tipo de economia (desenvolvida ou em desenvolvimento), clima (se aquecimento ou resfriamento é dominante) e se é nova a construção ou corresponde a um *retrofit*.

No caso brasileiro, embora seja um país em desenvolvimento, deveria ser analisada especificamente e com maior detalhamento cada uma das tecnologias propostas a fim de determinar as melhores opções para o país ou para cada região em específico. As melhores escolhas deveriam ser promovidas por meio de instrumentos de política pública.

⁵⁷ O Programa Passivhaus teve seu início em 1990, na Alemanha. Esse programa especificava exigentes normas no envoltório e indicava que a edificação devia ser confortável independentemente da temperatura externa. Além disso, o consumo máximo para aquecimento, resfriamento e ventilação, por ano, devia ser de 15 kWh/m².

A seguir, apresenta-se uma breve explicação de cada um dos elementos que podem ser melhorados no envoltório das edificações, sempre considerando que o objetivo principal no *design* avançado de edificações é eliminar a necessidade de equipamentos de aquecimento e resfriamento.

6.3.1.1.1 ISOLAMENTO

Segundo IEA (2013a), a maior perda de calor das edificações é pelos telhados, paredes e pisos, que representam a maior área externa tanto das edificações residenciais quanto dos prédios de serviços. Assim, um bom isolamento não permite a perda de calor em lugares com temperaturas baixas e impede a entrada de calor em lugares de temperaturas altas, além de ajudar na manutenção de um ambiente interno confortável.

Em IEA (2013a), alerta-se sobre a não instalação de sistemas de isolamento nas edificações que estão sendo construídas em algumas regiões de temperaturas elevadas, principalmente nos países em desenvolvimento. Portanto, espera-se aumento das cargas para resfriamento nessas regiões. Nesse sentido, em um contexto do papel que a inovação pode exercer para a redução de emissões de GEE, idealmente deveria ser considerada essa característica nas novas edificações que serão construídas nos próximos anos.

Atualmente, uma nova abordagem de construção encontra-se no mercado: painéis de isolamento do tipo “sanduíche”. Os painéis de isolamento do tipo “sanduíche” são sistemas pré-fabricados para isolamento de edifícios, geralmente consistindo em duas placas metálicas paralelas ligadas a um recheio interno de material isolante (ALLIANZ, 2015).

6.3.1.1.2 JANELAS

As janelas em uma edificação constituem o controle de entrada de luz e do fluxo do ar, permitem contato visual, proporcionam isolamento, segurança e privacidade, além de atribuir estética e beleza ao projeto (LAMBERTS et al, 2016). As janelas deveriam deixar entrar tanta luz quanto possível, minimizando o ganho de calor no verão e maximizando esse ganho no inverno. Escolhas adequadas de dimensionamento, fluxos de calor e de luz natural são importantes para equilibrar os fluxos de calor e de luz natural (IEA, 2013a).

Ao especificar o tipo de janela para determinada região, é necessário considerar as cargas por aquecimento e arrefecimento a fim de maximizar o desempenho e atingir o menor impacto energético anual.

Recentemente, em matéria de janelas, tem-se inovado com vidros dinâmicos que oferecem o potencial para modular o calor solar. Esse tipo de vidro tem a capacidade de mudar de opacidade ao aplicar uma corrente elétrica, controlando, dessa forma, a quantidade de luz e calor que passa através deles (MALMQUIST; SBAR, 2013). Segundo Casini (2014), alguns projetos-piloto têm mostrado economia da energia de 60% para iluminação, assim como redução da carga de resfriamento em 20% e do pico de carga em 26%.

6.3.1.1.3 SUPERFÍCIES REFLETIVAS

De acordo com IEA (2013a), em climas quentes, é melhor rejeitar tanto calor quanto possível da superfície do telhado. Um telhado “frio”, que pode ser simplesmente um telhado branco, pode refletir fortemente a luz solar visível e a luz solar infravermelha. Por sua vez, as superfícies “frias – coloridas” refletem mais do que as cores convencionais, mas menos do que o branco. Por exemplo, um telhado cinza comum pode refletir 20% da luz solar; um telhado vermelho, cerca de 40%; e um telhado branco vermelho; cerca de 80% (IEA; 2013a).

No Brasil, encontra-se atualmente um mercado estabelecido apenas para isolamento típico. O mercado das janelas e do isolamento de alto desempenho ainda se encontra em fase inicial. Em outras economias, como na União Europeia e nos Estados Unidos, a maioria dessas tecnologias se encontra na fase de mercado maduro (IEA, 2013a). Nesse sentido, maiores esforços devem ser feitos a fim de estabelecer esses mercados em economias como a brasileira. Salienta-se que uma das causas para que algumas tecnologias ainda estejam em fase inicial está relacionada com a adaptação que se deve fazer em cada economia local.

6.3.1.2 ORIENTAÇÃO E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Além do envoltório, outras propriedades têm influência no desempenho da edificação: a orientação e os parâmetros geométricos (RODRÍGUEZ-UBINAS et al., 2014).

Os ganhos e as perdas de energia térmica são determinados pelas propriedades termofísicas do envoltório da edificação. Segundo Rodríguez-Ubinas (2014), a forma da edificação determina o tamanho da superfície que será objeto de radiação solar, e a orientação determina quais áreas recebem diretamente radiação e quais seriam afetadas pelo vento. Nesse sentido, a orientação da edificação determina potencial de uso ou proteção da radiação solar e do vento. A orientação pode ser analisada em três dimensões: a edificação completa, as partes construídas e as partes com vidros.

6.3.1.3 OUTRAS ESTRATÉGIAS PASSIVAS

Outras estratégias não requerem energia da rede para melhorar o desempenho da edificação. As estratégias passivas auxiliam a evitar condições climáticas não desejadas, aproveitando os recursos oferecidos pela localização da construção, como radiação solar, vento, variabilidade térmica, luz do dia e temperatura do solo (TORGAL et al., 2013; RODRÍGUEZ-UBINAS et al., 2014a).

No âmbito das soluções passivas para aquecimento, existem fachadas com vidro duplo, muros de água, proteções contra o vento, entre outros. No caso de soluções passivas para resfriamento, há telhados e paredes verdes, ventilação natural, fachadas e telhados ventilados, chaminé solar etc. Segundo Rodríguez-Ubinas et al. (2014b), o armazenamento de energia térmica é considerado uma estratégia passiva, a qual será descrita adiante.

6.3.2 ESTRATÉGIAS ATIVAS: TECNOLOGIAS EFICIENTES

6.3.2.1 AQUECIMENTO, ARREFECIMENTO E AR-CONDICIONADO (HVAC)

Os usos aquecimento de espaços e de água e resfriamento de espaços contabilizam cerca de 55% da energia usada nas edificações, no mundo. Assim, esses usos representam o maior potencial de redução de consumo de energia no setor de edificações (IEA, 2013b). Uma abordagem sistêmica, que integre as necessidades por aquecimento e arrefecimento com o envoltório das edificações, é necessária a fim de atingir maior eficiência energética no setor.

O Quadro 5 mostra recomendações imediatas e futuras para atingir maior nível de eficiência nos usos de aquecimento e arrefecimento em edificações.

Quadro 5 – Recomendações de Aquecimento e Arrefecimento

Tecnologia	Recomendações imediatas	Requerimentos futuros
Aquecedor elétrico de ambientes	• Evitar a venda de fontes de aquecimento central • Promover/regular a venda de bombas de calor	• Tecnologia avançada de bombas de calor • Tecnologia solar térmica
Chuveiro elétrico	• Evitar a venda de chuveiros elétricos • Promover a venda de bombas de calor para aquecimento de água e aquecedores solares térmicos	• Tecnologias de baixo custo de bombas de calor para aquecimento de água e aquecedores solares térmicos
Aquecedor a gás por acumulação e forno de gás	• Requer aumento na eficiência até atingir níveis maiores que 95%	• Investimento em bombas de calor a gás com COP de 1,2 ou maior. Pensar na possibilidade de micro cogeração
Aquecedor a gás de passagem	• Promover/regular padrões de aquecedores de gás por acumulação e promover aquecedores de gás por acumulação instantâneos	• Misturar as funções das bombas de calor de gás com sistemas de acumulação solar térmica
Aquecedor de espaços e água convencional de biomassa	• Promover baixo custo e alta eficiência em lareiras e fogões	• Mudar para energia solar térmica e formas limpas de energia • Melhor uso da biomassa em sistemas centrais

Fonte: Elaboração própria a partir de IEA, 2013b

Três áreas têm sido destacadas como críticas para serem analisadas, dado que poderiam auxiliar na redução do consumo de energia para aquecimento e arrefecimento: tecnologia solar térmica, bombas de calor e sistemas de cogeração (IEA, 2013b). As prioridades incluem o aprimoramento na eficiência das tecnologias existentes com vistas a ampliar a gama de aplicações, considerando, por exemplo, as condições climáticas particulares (IEA, 2011).

No caso particular da energia solar térmica, é necessário desenvolver novos produtos e aplicações da energia solar térmica, assim como reduzir o custo da tecnologia. As áreas-chave são aumento da eficiência nos coletores solares térmicos, pequenos sistemas solares térmicos para serem usados em resfriamento e sistemas de grande capacidade para serem usados em redes de geração distribuída.

Os coletores solares térmicos têm tido rápido desenvolvimento no mundo. Por exemplo, na China, a taxa de crescimento alcança 30% (DENG et al., 2014). Segundo Jaisankar et al. (2011), esse sistema tem sido usado no setor residencial e industrial devido à facilidade de operação e manutenção. O sistema inclui tanque de armazenamento e coletor solar. A eficiência de conversão térmica é de cerca de 70%, enquanto a eficiência de conversão elétrica é de 17%.

Durante o verão, existe um excesso de energia térmica que pode ser usado para arrefecimento com sistemas simples de absorção e adsorção (DE LIETO VOLLARO et al., 2014). Um *chiller* de absorção usa energia térmica solar fornecida pelo sol para produzir frio ou/e desumidificação.

De acordo com Estif (2015), o arrefecimento solar tem certas vantagens sobre outras tecnologias, por exemplo, pode ajudar a diminuir o pico do consumo de energia elétrica associado ao arrefecimento convencional. Mais do que isso, esse tipo de tecnologia poderia ser usado durante a noite com um sistema de armazenamento térmico.

Além do mencionado anteriormente, uma edificação com alto desempenho energético deve levar em consideração os seguintes aspectos (IEA, 2013b):

- Materiais alternativos: desenvolvimento de novos materiais para uso em coletores, por exemplo, polímeros e revestimento de novos materiais absorventes e resistentes à degradação causada pela radiação ultravioleta;
- Integração de coletores solares e componentes da edificação: o envoltório da edificação deve ser um coletor solar em si mesmo. Tanto o desempenho dos coletores quanto sua integração direta com as edificações devem ser objeto de otimização no futuro;
- Tecnologias melhoradas e armazenamento de energia solar térmica: o aprimoramento dessas tecnologias permitiria que fossem necessárias frações solares relativamente baixas para o funcionamento. Além disso, é preciso incentivar a pesquisa em novos materiais térmicos e em dispositivos termoquímicos inovadores;
- Sistemas de controle inteligente: precisa-se de sistemas de controle que se comuniquem com os sistemas de gerenciamento de energia nas edificações, visando ao uso da energia solar disponível. Os sistemas de controle centralizados e integrados devem ter a capacidade de autodiagnosticar problemas, enquanto facilitam a integração com sistemas complementares (por exemplo: tecnologia solar híbrida térmico-fotovoltaica).

No caso das bombas de calor, segundo IEA (2013b), as prioridades continuam sendo o aprimoramento das tecnologias existentes visando maximizar os COP. Essa tecnologia pode funcionar tanto para aquecimento quanto para arrefecimento de espaços. Requer-se aprimorar operação, controle e tamanho dos sistemas, assim como integrar as bombas de calor com o *design* da edificação. Em particular, uma edificação com alto desempenho energético em um cenário de inovação deve levar em consideração o citado a seguir no tocante às bombas de calor (IEA, 2013b):

- Bombas de calor para aquecimento de água: uma edificação de alto desempenho deveria ter acesso a esse tipo de tecnologia. A barreira não está relacionada com a tecnologia em si, mas aos poucos fornecedores e aos altos custos;
- Equipamentos e componentes: a queda nos custos e o aumento na confiabilidade e no desempenho de trocadores de calor e compressores;
- Sistemas híbridos e integrados: sistemas de bombas de calor que misturem múltiplas funções (por exemplo, condicionamento de espaços e aquecimento de água) e sistemas de bombas de calor híbridas que poderiam ser combinadas com outras tecnologias (central térmica que utilize lixo para o uso aquecimento, térmico solar e sistemas avançados de aquecimento e arrefecimento).

Por fim, como tecnologia para atender o uso de aquecimento nas edificações, deve ser considerado o *boiler* a biomassa. Segundo Saidur et al. (2011), a utilização de biomassa para *boiler* tem benefícios econômicos, sociais e ambientais, assim como a diminuição no uso de recursos fósseis. Esta é considerada como tecnologia que ainda está em desenvolvimento para o setor de edificações, principalmente em áreas rurais. A biomassa poderia fornecer aquecimento para toda a casa ou poderia ser considerada como fonte de aquecimento secundária.

6.3.2.2 ILUMINAÇÃO

Atualmente, para atender o uso iluminação, estão sendo desenvolvidas tecnologias de iluminação de estado sólido (*solid-state lighting* – SSL). Como tecnologias consideradas inovadoras, encontram-se os emissores de luz orgânicos (OLED) e os díodos emissores de luz baseados em polímeros (PLED). Os díodos atuam como fonte de iluminação, em oposição aos sistemas, que usam filamentos ou gases.

A tecnologia de iluminação OLED está em uma fase em que a comercialização é possível, mas o obstáculo para sua adoção é o custo, embora tenha apresentado progresso substancial em 2014 (DOE, 2015). No mesmo sentido, McKinsey (2012) assevera que a penetração desse tipo de tecnologia ainda não é clara devido aos altos preços comparados, por exemplo, com a tecnologia LED.⁵⁸ Embora a tecnologia OLED ainda não tenha chegado ao seu máximo desenvolvimento, autores como Thejokalyani e Dhoble (2014) afirmam que essa tecnologia é candidata potencial no uso iluminação.

Segundo DOE (2015), a eficácia dos painéis OLED está continuamente aumentando. Por exemplo, em 2014, a empresa Konica Minolta conseguiu desenvolver um dispositivo com essa tecnologia que atingiu eficácia de 139 lm/W e tempo de vida de 55.000 horas. Embora tenham sido atingidos, por várias empresas, níveis de eficiência parecidos, um dispositivo que poderia entrar em comercialização ainda não passa de 60 lm/W.

No setor residencial, em particular, deve ser considerada como aplicação emergente dessa tecnologia de iluminação de espectro controlado a possibilidade de obter respostas fisiológicas humanas desejadas, como iluminação para tornar as pessoas mais alertas ou facilitar o sono (DOE, 2014b).

⁵⁸ Enquanto uma lâmpada LED de 12 W no mercado dos Estados Unidos pode custar cerca de 16 USD/klm, um painel OLED pode custar 500 USD/klm e uma luminária OLED, 1.400 USD/klm (DOE, 2014b).

Por sua vez, a tecnologia PLED pode ser considerada como fonte promissora, dado que os polímeros podem ser produzidos de forma econômica, além de serem leves e flexíveis. Ademais, essa tecnologia tem uma série de qualidades inerentes, ideais para a iluminação, como espectro completo de cores, alto brilho com baixa tensão e longos períodos de vida útil (IEA, 2013b).

6.3.2.3 Cocção

Os energéticos predominantemente usados no Brasil para esse uso são lenha e GLP, que representaram 51,6% e 44,0% no uso cocção em 2010. A biomassa é tipicamente usada em fogões básicos. Visando à necessidade de aprimorar a eficiência das tecnologias de cocção que usam esse combustível, em 2010, o Departamento de Estado dos EUA, com a Fundação das Nações Unidas, criou a Aliança Global para Fogões Limpos (*The Global Alliance for Clean Cookstoves*) (IEA 2013b). Essa aliança promove o uso de fogões eficientes e de baixo custo.

Tecnologias que podem ser consideradas inovadoras no uso cocção no Brasil são:

- Fogões de biomassa avançados: os fogões de ar forçado, que usam biomassa processada ou tradicional, podem aumentar significativamente a eficiência energética, reduzindo o uso de combustível em 60%, quando comparados com fogões tradicionais de queima aberta (IEA, 2013b). Segundo IEA (2013b), os fogões de biomassa avançados usam um ventilador para soprar em alta velocidade, além de entradas de ar na câmara de combustão que permitem a combustão completa da biomassa;
- Fogões solares: essa tecnologia é um substituto potencial da biomassa, sendo que esses equipamentos aproveitam a radiação solar como fonte de energia (ADRIA; BETHGE, 2013). Há três tecnologias, principalmente, de fogões solares: fogões de painel, fogões de caixa e parabólicos. Os fogões de painel são os menos custosos e os mais fáceis de transportar, além de usar lâminas refletoras para coletar a luz solar e aquecer a panela;
- Fogões de indução: embora essa tecnologia seja bem utilizada nos Estados Unidos e na Europa, pode ser considerada como tecnologia inovadora no Brasil. Essa tecnologia usa eletricidade para fornecer o aquecimento e a cocção de alimentos. Enquanto os fogões convencionais elétricos usam placas de ferro como unidade de aquecimento, os fogões de indução são mais sofisticados e usam unidades infravermelhas, halógenas ou de indução, que se encontram posicionadas por baixo de uma placa de vidro. Essas placas não emitem calor, mas consistem em um campo magnético alternado. Segundo Adria e Bethge (2013), o total de energia primária consumida em um fogão elétrico convencional é 792 kWh, enquanto em um fogão de indução é 699 kWh, sendo as eficiências 13% e 15%, respectivamente.

6.3.2.4 OUTROS USOS

Essa categoria tem grande quantidade de equipamentos que incluem televisores, computadores, rádios, *plugload* e outros eletrônicos. Segundo IEA (2013b), a redução no consumo de energia desses equipamentos será produto do aumento da eficiência e consequência do uso de ferramentas de gerenciamento da demanda, por exemplo, equipamentos inteligentes. Para alguns equipamentos, espera-se melhoria da eficiência em algumas das suas características e, portanto, poderiam ser considerados em um cenário de inovação (IEA, 2013b).

6.3.2.4.1 MÁQUINAS DE LAVAR E SECAR

Nas máquinas de lavar, são considerados sistemas mais eficientes de aquecimento de água sensores de controle de temperatura e otimização do ciclo de lavado. No longo prazo, os aprimoramentos estão relacionados a dissociação eletrolítica da água, lavagem ultrassônica, lavagem de bolhas e ozonizada.

No caso de máquinas de secar roupa, o principal aprimoramento está relacionado à recuperação do ar quente do exaustor e à eficiência do envoltório do equipamento. Outras opções, como a secagem de roupas com equipamentos de micro-ondas, têm sido propostas, mas não estão comercialmente disponíveis.

As maiores oportunidades de economia da energia para secagem de roupa são a instalação de secadores de roupa com a tecnologia de bomba de calor e a possibilidade de fazer troca de combustível de energia elétrica por gás natural.

6.3.2.4.2 TELEVISÃO

A tecnologia da tela do televisor é a característica mais importante da eficiência do equipamento, enquanto o tamanho é a característica que determina o consumo de energia. Nesse sentido, na combinação ótima dessas duas características estaria a redução no consumo de energia. No cenário BC+I, também poderia ser considerado o aprimoramento que se espera tanto das telas LCD quanto das PDP.

6.3.2.4.3 COMPUTADOR E ELETRÔNICOS

São necessários maiores esforços a fim de alcançar maior capacidade de gerenciamento de energia nos equipamentos. No mesmo sentido, as unidades de suprimento de energia devem estar dimensionadas corretamente para maximizar a eficiência energética. Também se espera aprimoramento no *stand-by* de aparelhos eletrônicos e equipamentos inteligentes.

6.3.2.5 DEMAND SIDE MANAGEMENT – DSM

Uma edificação inteligente é equipada com informação e tecnologia de comunicação baseada em sistemas para que os ocupantes da casa possam acessar remotamente a fim de controlar ou programar os equipamentos eletrônicos (IEA, 2013b). Assim, o dono da casa poderia, com seu *smartphone*, ativar o sistema de segurança da casa, controlar a temperatura de casa, ligar ou desligar aparelhos, controlar a iluminação, programar o sistema de entretenimento.

Nas edificações inteligentes, os equipamentos podem ser programados a fim de responder à influência das condições externas, como clima ou sinais do fornecedor de eletricidade. Isso visa não apenas a segurança e eficiência energética, mas também a questões relacionadas com a melhora de saúde e conforto.

6.3.2.6 GERAÇÃO ON-SITE

Além da tecnologia solar fotovoltaica e turbinas eólicas para edificações, já descritas, ao considerar uma edificação de alto desempenho energético, dever-se-ia ponderar a tecnologia de pilha de combustível.

A pilha ou célula de combustível é um dispositivo eletroquímico que converte a energia de uma reação química em energia elétrica, calor e água (WBDG, 2015).

Uma célula de combustível é composta por várias células, sendo que cada uma tem um ânodo (polo +) e um cátodo (polo -) separado por uma membrana que só deixa passar prótons da molécula de hidrogênio. O hidrogênio é injetado na célula de combustível. Quando em contato com o ânodo, os elétrons são separados dos prótons. Os prótons passam pela membrana, enquanto os elétrons são dirigidos para o ânodo, criando, dessa forma, uma corrente elétrica.

Por outro lado, o ar entra na célula combustível e, ao chegar ao cátodo, o oxigênio contido no ar divide a molécula de oxigênio em dois. Os elétrons, os prótons e os átomos de oxigênio se combinam para produzir água (Figura 176). Nesse sentido, a partir do hidrogênio, juntamente com o oxigênio, produzem-se eletricidade e água. Essa reação liberta calor, que também poderia ser usado (WBDG, 2015; IEA, 2015).

Segundo WBDG (2015), uma das vantagens dessa tecnologia é que o hidrogênio pode ser produzido a partir de vários recursos domésticos, como: biomassa (via reforma catalítica ou gaseificação, seguida de purificação), eletrólise da água, gás natural, gás propano e metanol. A princípio, a pilha combustível funciona como uma bateria, porém, ao contrário de uma bateria, esta não precisa ser recarregada.

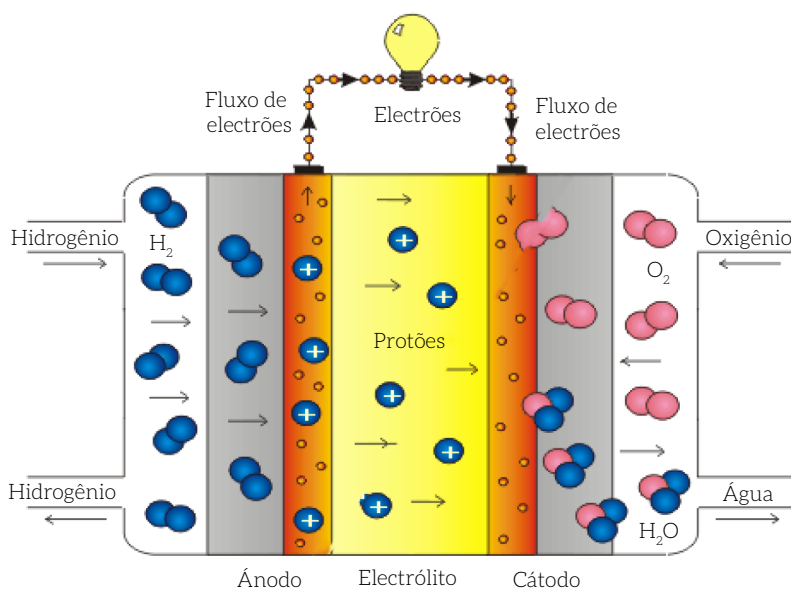


Figura 176 – Pilha de Combustível

Fonte: MOURA, 2009

No setor residencial, a cogeração de energia elétrica e calor permite, por exemplo, que o calor residual que ocorre durante a reação seja usado para fim de aquecimento (IEA, 2015). Isso poderia aumentar a eficiência energética nas edificações. No mesmo sentido, IEA (2015) assevera que a geração descentralizada de energia elétrica e calor usando sistemas de microcogeração permite o atendimento da demanda sem necessidade de acudir à rede central de calor e de energia elétrica.

A Tabela 92 mostra as características da célula de combustível que atualmente se encontra em fase inicial de introdução no mercado das edificações.

Tabela 92 – Desempenho de uma Pilha Combustível no Setor de Edificações

Aplicação	Potência	Eficiência energética	Custo de investimento
Célula de combustível micro cogeração	0,3 – 25 kW	Elétrica: 35-50% Cogeração: 95%	US\$ 20.000/kW (sistema residencial 1 kWe) US\$ 10.000/kW (sistema comercial 25 kWe)

Fonte: IEA, 2015

6.3.2.7 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

As tecnologias de armazenamento de energia auxiliam na segurança energética e no enfrentamento das mudanças climáticas. Algumas tecnologias podem ser consideradas maduras, ou perto desse estágio, mas a maioria está na fase de desenvolvimento.

Nos cenários REF e BC, não foi levada em consideração a possibilidade de armazenamento de energia. Nesse sentido, o cenário BC+I do setor de edificações analisará algumas das tecnologias para armazenamento de energia elétrica e térmica em pequena escala.

As tecnologias de armazenamento de energia são classificadas de acordo com seu *output*, energia elétrica ou térmica. Ressalta-se que, por exemplo, no caso do armazenamento de energia térmica, esta pode nivelar a diferença de temperatura entre o dia e a noite, reduzindo a demanda de energia por aquecimento e ar-condicionado.

A Figura 177 mostra o nível de maturidade de diferentes tecnologias de armazenamento de energia elétrica e térmica desagregado por estágios de pesquisa e desenvolvimento, demonstração e comercialização. Salienta-se que não são apresentadas apenas tecnologias usadas no setor de edificações.

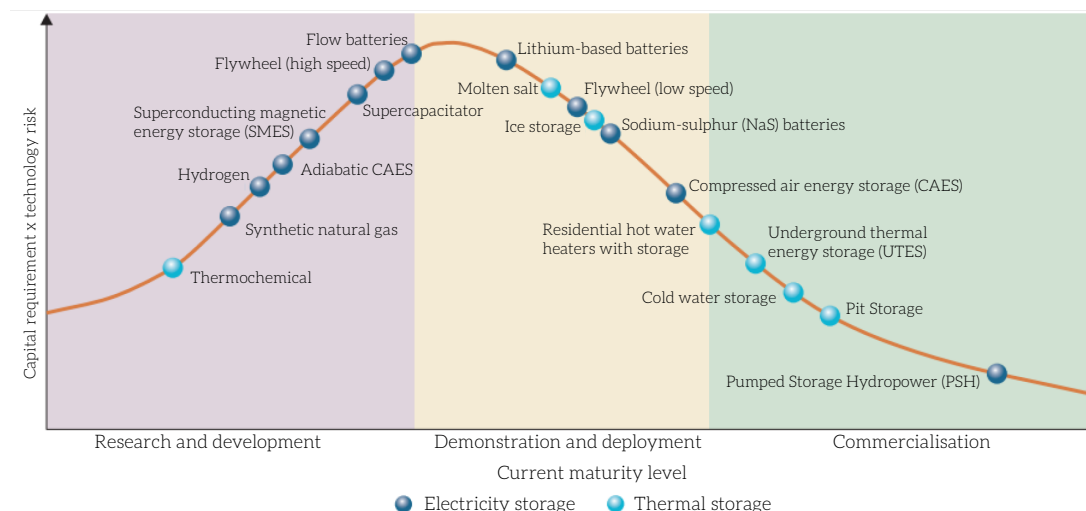


Figura 177 – Nível de Maturidade das Tecnologias de Armazenamento de Elétrica e Térmica

Fonte: IEA, 2014

Cabe uma ressalva sobre os chamados elementos raros da terra (REE), usados amplamente nas tecnologias de armazenamento de energia. Os desafios da oferta de alguns desses materiais, como disprósio, neodímio, térbio, európio e ítrio, estão relacionados com possíveis interrupções na oferta no curto prazo (IEA, 2014). Além dessa dificuldade, no longo prazo, deve-se considerar a questão relacionada com a reciclagem desses elementos a fim de minimizar os impactos ambientais derivados de sua exploração e processamento, assim como o risco da redução da oferta dos países com vastas reservas àqueles com alta demanda (IEA, 2014).

O armazenamento de energia térmica é uma opção de armazenamento *on-site* que tem como vantagem o uso direto na climatização de espaços. Por exemplo, nessa categoria, poderia ser citada a massa térmica de uma edificação, que corresponde à capacidade do material de construção de armazenar calor. Embora esta possa ser considerada uma tecnologia passiva, relativa ao envoltório, também pode ser considerada como de armazenamento de energia térmica. No mesmo sentido, encontram-se como tecnologia de armazenamento térmico os *chilled-water storage*, que são tanques usados, em geral, em edificações comerciais (DOE, 2010).

No caso de armazenamento de eletricidade, poderiam ser consideradas em um cenário de inovação tecnologias de armazenamento eletroquímico e supercapacitores magnéticos. Encontram-se em fase de demonstração e desenvolvimento de baterias de diferentes materiais (Figura 177). Dentre elas, destaca-se a de lítio, que poderia ser uma fonte promissória de armazenamento de energia no setor de edificações, o que poderia auxiliar no aproveitamento de toda a energia gerada no uso de painéis solares fotovoltaicos, por exemplo. Por sua vez, os supercapacitores magnéticos encontram-se na fase de pesquisa de desenvolvimento. Essa tecnologia consiste no armazenamento de energia sob a forma de um campo magnético.

6.4 PREMISSAS E RESULTADOS

Visando construir o cenário BC+I do setor de edificações brasileiro até 2050, este relatório fará uso da definição de ZEB. Embora não exista uma definição clara para ZEB, pode-se afirmar que uma edificação com alto desempenho energético, ou seja, que considere estratégias passivas (envoltório, orientação e outros parâmetros geométricos), estratégias ativas (tecnologias eficientes), *on-site generation* (fotovoltaica, minieólica, pilha de combustível) e tecnologias de armazenamento de energia, pode ser considerada como tal. A ideia de uma edificação de alto desempenho energético é que não consuma energia do *grid*.

Segundo Rodríguez-Urbinas (2014), quando a geração de energia é maior do que a demanda, a edificação pode ser considerada *energy plus*; quando a geração iguala à demanda, a edificação é ZEB; e quando a geração é menor que a demanda, mas não se afasta muito, a edificação pode ser considerada nZEB.

Pressupõe-se, nesse cenário, que o setor de edificações brasileiro adotará o conceito de ZEB. Como já mencionado, Estados Unidos, Europa e Reino Unido têm especificado que tanto as novas edificações residenciais quanto comerciais deveriam ser ZEB entre 2016 e 2025. No caso brasileiro, adotou-se como premissa que o governo especificará uma lei similar na próxima década. Assim, assume-se que, em 2025, o governo brasileiro instaure a lei de ZEB e que esta entre em vigor dez anos depois, ou seja, em 2035. Nesse sentido, as novas residências, a partir do ano 2035, deverão, obrigatoriamente, não consumir energia do *grid*.

A Figura 178 mostra a penetração de ZEB considerada no cenário BC+I. Para o ano 2050, utilizando a projeção de novos domicílios apresentadas na seção 4.1.1, espera-se que 11.531.000 edificações não consumam energia do *grid*. Esse dado corresponderia a 11,71% do total de edificações estimado para 2050.

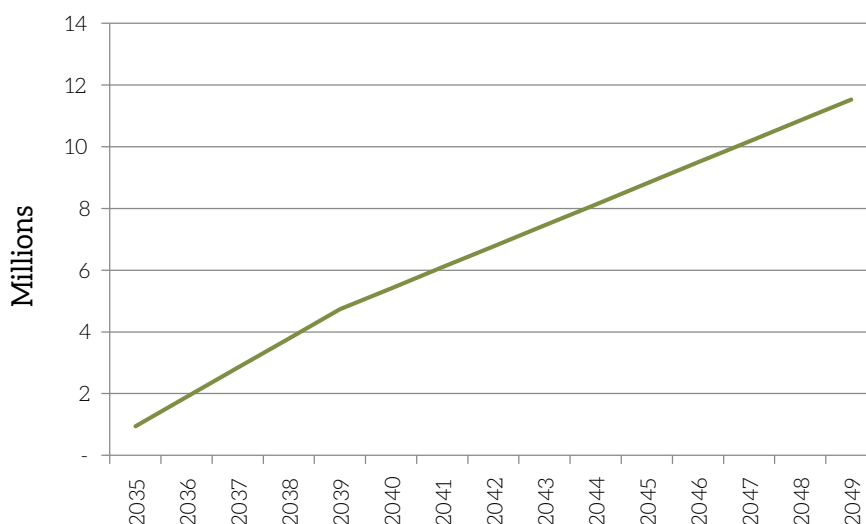


Figura 178 – Penetração de Domicílios ZEB (número de domicílios)

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE, 2013; EPE, 2014a

A penetração de ZEB, após 2030, não reduz significativamente o consumo de energia em edificações. Isso se deve à premissa de apenas novas residências serem ZEB, permanecendo um estoque grande de residências antigas. Ressalta-se, entretanto, que existe a possibilidade de *retrofit* de residências antigas, o que pode incrementar o potencial de redução no consumo de energia externo às residências. Porém, isso ocorreria a custos mais altos, motivo pelo qual essa possibilidade foi desconsiderada neste estudo.

As medidas de mitigação no setor de edificações incluem mudanças estruturais e comportamentais difíceis de modelar/implementar. Um fator que dificulta a adoção de medidas de mitigação que vão além das tecnologias de uso final de energia é a alta vida útil das edificações, que gera alto risco de *lock-in* tecnológico. Segundo Lucon et al. (2014), 80% do consumo energético no setor de 2005 estará “preso” em 2050. Assim, medidas que induzam mudanças nessas áreas devem ser implementadas já, para que se evite a construção de edificações com padrões de consumo energético altos. Porém, códigos de construção dificilmente incluem metas/padrões para eficiência energética.

Em vista desse *lock-in* estrutural e da interação com outras áreas de conhecimento, como arquitetura e planejamento, na medida em que políticas de preço têm impacto limitado na adoção de medidas de mitigação por parte do setor de edificações, é necessário que se promovam políticas de comando e controle (programas e regulações). Tais políticas incluem normas para construção de novas edificações, padrões de eficiência energética, padrões tecnológicos, entre outros aspectos que serão avaliados no capítulo que trata dos instrumentos de política pública que viabilizariam a implementação dos cenários de baixo carbono elaborados neste estudo.

6.5 CONSOLIDAÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

A Figura 179 consolida as projeções de consumo total de energia e emissões (totais e evitadas) dos cenários REF, BC e BC+I. Nos cenários BC e BC+I, poderia ser alcançada redução de 42% a 45% no consumo de energia com relação ao cenário REF, respectivamente. A penetração de um novo estoque de edificações de alto desempenho, a partir de 2035, faz que o cenário de BC+I apresente, em 2050, com relação ao cenário BC, incremento de redução nas emissões de 7 MtCO₂.

Trata-se de um cenário adicional ao cenário BC, no qual as edificações ZEB têm menor impacto em termos de mitigação de emissões. Por esse motivo, persistem como medidas com maior potencial a eficiência energética da climatização comercial e de fogões a GLP no setor residencial.

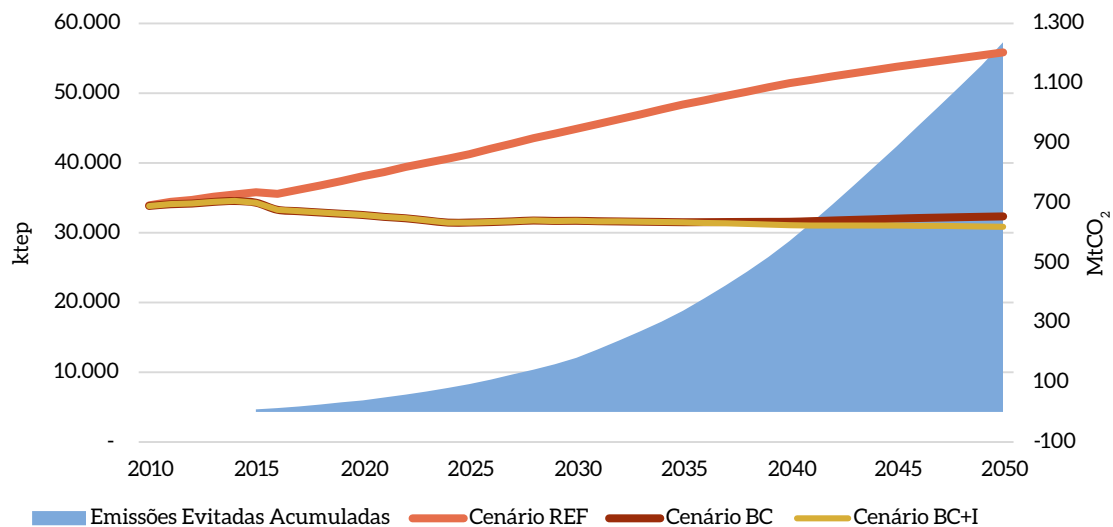


Figura 179 – Consumo Total de Energia nos Cenários REF, BC e BC+I e Emissões Totais Evitadas do Cenário BC+I com relação ao Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Os cenários de baixo carbono indicam a existência de oportunidades econômicas associadas à adoção das atividades de baixo carbono pelo setor, que, por não fazerem parte do cenário referencial, parecem apontar para a existência de possíveis barreiras não econômicas que impedem a adoção das medidas. No próximo capítulo, serão descritas, no nível de cada atividade de baixo carbono, as barreiras e propostas de instrumentos de política pública para superá-las.



Proposição de instrumentos de política pública para a implementação dos cenários BC no setor de edificações

Capítulo

7

7 PROPOSIÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS BC NO SETOR DE EDIFICAÇÕES

Este capítulo objetiva propor instrumentos de política pública capazes de remover barreiras e potencializar cobenefícios associados à adoção dos cenários BC e BC+I, com vistas a mitigar emissões de GEE no setor de edificações.

O cenário BC elencou uma série de medidas que permitiriam acumular redução de emissões de cerca de 1,2 bilhão de tCO₂ até 2050, o que representaria emissão total 42% menor em 2050 em relação ao cenário referencial do setor. Cumpre destacar que o cenário BC+I não foi avaliado em termos de custos de abatimento em função da inexistência de parâmetros econômicos necessários para a sua mensuração, como custos de capital e de operação e manutenção. Todavia, foi possível mensurar um potencial de mitigação de emissões de GEE, que seria de aproximadamente 45% em 2050 em relação ao cenário REF.

Pôde-se constatar que grande parte das atividades de baixo carbono tem custos de abatimento positivos (Tabela 93), o que indica barreiras econômicas para sua adoção. O custo total de implementação das medidas é de aproximadamente US\$ 2,9 trilhões.

Tabela 93 – Potencial, Custo Marginal e Total de Abatimento das Medidas de Mitigação Aplicáveis ao Setor de Edificações

Medida de mitigação (Setor)	Potencial total de mitigação (MtCO ₂)	Custo marginal de abatimento (US\$/tCO ₂)	Custo total (US\$ milhões)
Eficientização de fogões a GN (residencial)	44	-488	-21.472
Eficientização da iluminação (comercial e serviços)	99	-263	-26.037
Eficientização de aquecedores a GN (residencial)	7	-36	-252
Eficientização de fogões GLP (residencial)	201	-10	-2.010

Medida de mitigação (Setor)	Potencial total de mitigação (MtCO ₂)	Custo marginal de abatimento (US\$/tCO ₂)	Custo total (US\$ milhões)
Eficientização de chuveiros elétricos (residencial)	3	218	654
GD a partir de painéis FV – região Nordeste (residencial, comercial e serviços)	44	1.633	71.852
Substituição de chuveiros elétricos por SAS (residencial)	4	1.933	7.732
GD a partir de painéis FV – região Sudeste (residencial, comercial e serviços)	145	2.092	303.340
Eficientização da iluminação (público)	6	2.590	15.540
Eficientização da iluminação (residencial)	15	2.655	39.825
GD a partir de painéis FV – região Sul (residencial, comercial e serviços)	15	2.908	43.620
Eficientização de <i>freezers</i> (residencial)	15	2.974	44.610
Eficientização da climatização (comercial e serviços)	483	3.206	1.548.498
Eficientização das geladeiras (residencial)	96	5.668	544.128
Eficientização da climatização (residencial)	38	6.200	235.600
GD a partir de painéis FV – região Norte (residencial, comercial e serviços)	3	7.120	21.360
GD a partir de painéis FV – região Centro-Oeste (residencial, comercial e serviços)	12	10.199	122.388
Total	1.230	-	2.949.376

Fonte: Elaboração própria

Todavia, mesmo medidas com custos de abatimento negativos, como é o caso de ações de eficientização da cocção e iluminação nos setores residencial e comercial/serviços, respectivamente, enfrentam barreiras para sua implementação, como desconhecimento dos benefícios econômicos e ambientais da medida, acesso a crédito para a realização de investimentos, entre outras. Esses aspectos exigem a formulação de instrumentos de política pública para remover barreiras não econômicas à adoção das atividades de baixo carbono, o que potencializaria a eficácia de políticas de mitigação de emissões de GEE no setor.

Com o objetivo de fornecer elementos para que os formuladores de política pública possam implementar, efetivamente, políticas de baixo carbono no setor, serão discutidos os seguintes tópicos neste capítulo:

- i) Identificação de barreiras, cobenefícios e experiências internacionais e nacional de políticas públicas para a adoção de atividades de baixo carbono no setor de edificações;
- ii) Instrumentos de política pública aplicáveis, setorialmente, para promover o abatimento de emissões de GEE;
- iii) Síntese da proposta de instrumentos de política pública para a implementação dos cenários de baixo carbono.

7.1 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS À ADOÇÃO DE MEDIDAS DE BAIXO CARBONO NO SETOR DE EDIFICAÇÕES

O processo de decisão para a adoção de medidas de mitigação no setor de edificações é diferente dos demais setores da economia em função de diversas barreiras de mercado específicas do setor. Além de ser muito heterogêneo, há grandes barreiras à penetração de medidas de abatimento no setor de edificações, como: fragmentação do setor em um número grande de pequenos agentes; informação imperfeita; custos de transação; altas taxas de desconto; falta de acesso a financiamento; subsídios energéticos; problema agente-principal; barreiras culturais e comportamentais; *lock-in* tecnológico (LUCON et al., 2014).

Uma barreira econômica transversal às atividades de baixo carbono é a dificuldade de acesso e o custo do crédito para aquisição de equipamentos, dado pelas altas taxas de desconto dos setores. Essa barreira é maior em atividades com custo de abatimento positivo, como é o caso de efficientização de chuveiros elétricos e climatização, iluminação nos setores residencial e público, geração distribuída, entre outras, na medida em que não há viabilidade econômica ao longo da vida útil dos equipamentos. E, no caso da difusão e efficientização de aquecedores e cocção a gás natural, são barreiras comuns falta de acesso e volatilidade de preços do insumo energético, assim como o elevado custo de instalação nas edificações.

No segmento residencial, o processo decisório torna-se mais difícil do que no segmento comercial/serviços, pois o custo de oportunidade do capital é dado pelos investimentos alternativos ou por possibilidades de consumo no presente. Portanto, enquanto o custo de oportunidade do capital em um setor produtivo passa pela função de lucro, nas famílias, passa pela função utilidade, ou pelas preferências, cuja estimação é fundamentalmente mais complexa e incerta. Tipicamente, as iniciativas de eficiência energética são sobrepostas por outras prioridades imediatas, em parte porque a melhoria da eficiência energética é uma política que produz benefícios em médio e longo prazo (BPIE, 2011). A implementação de medidas de efficientização energética também é mais complexa no setor residencial devido ao desconhecimento, sobretudo em famílias de baixa renda, dos benefícios em termos energéticos, ambientais e econômicos.

No segmento público, há o problema de distribuição dos benefícios, que inibe o incentivo de preços ao agente consumidor. Isso ocorre quando o agente que consome a energia não é o mesmo que paga por ela. Assim, investimentos em eficiência energética no segmento público demandam planejamento e administração do setor.

Outro fator que dificulta a adoção de medidas de mitigação no setor é a longa vida útil das edificações, elevando o risco de *lock-in* tecnológico. De acordo com Lucon et al. (2014), 80% do consumo energético do ano de 2005 estarão “presos” em 2050, o que faz que medidas que induzam mudanças no setor devam ser implementadas de imediato, usualmente, por meio de políticas de comando e controle (programas e regulações), que incluem normas para construção, padrões tecnológicos e de eficiência energética. Esse aspecto se faz presente, sobretudo, em edificações antigas, nas quais não foi prevista a possibilidade de aquecimento e cocção a partir do gás natural.

Ademais, deve-se ter em conta que o setor de edificações consiste, por um lado, de agentes produtivos (firmas) que agem segundo uma racionalidade econômica de maximização do lucro. Entre esses segmentos, estão os setores comercial e de serviços. Esses setores percebem as medidas de mitigação como possíveis investimentos rentáveis na medida em que estão relacionados a redução de gastos com energia. É de se esperar, portanto, que em um mercado com informação perfeita e agentes racionais, medidas que trazem fluxo de caixa positivo a dada taxa de desconto (supondo esta como equivalente ao custo de oportunidade do capital naquele setor) deverão ser adotadas. Nesse caso, políticas de precificação de carbono que gerem aumento do custo com energia podem aumentar a atratividade de tais medidas. Entretanto, há diversas barreiras de mercado que impedem que isso ocorra de forma ótima. Por exemplo, na medida em que o gasto com energia é pequeno, em face do custo total de produção desses setores, a atenção dada é pequena. De fato, estudos indicam que preços de carbono precisam ser muito altos e mantidos por um longo tempo para surtirem efeitos em edificações (LUCON et al., 2014).

No caso do setor residencial – diferentemente de um setor produtivo, em que investimentos objetivam retorno financeiro e o custo de oportunidade do capital é dado pelos investimentos alternativos aos quais determinado agente tem acesso –, muitas vezes, o custo de oportunidade são possibilidades de consumo no presente. Assim, um investimento em eficiência energética pode competir, por exemplo, com uma viagem de férias ou um carro novo,⁵⁹ e não com o retorno desse montante em uma aplicação financeira.

No caso da construção civil, também ocorre o problema associado à distribuição dos benefícios. Os custos mais altos na construção de edificações de alto desempenho energético são incorridos, pelo menos em parte, pela construtora, enquanto o benefício em termos de menor gasto com energia é auferido pelos moradores. Isso é uma barreira relevante, na medida em que a vida útil das edificações é muito alta, gerando um *lock-in* tecnológico/estrutural. Ou seja, a escolha no momento da construção quanto à adoção ou não de envoltórios eficientes repercutirá durante longo período.

No âmbito da geração distribuída, uma série de barreiras pode ser mencionada: dificuldade para garantir as condições de estabilidade do sistema elétrico, principalmente diante de alta penetração de

59 Em classes de rendas mais baixas, pode até competir com gastos com o atendimento de necessidades básicas.

geração renovável e veículos elétricos; falta de especificação regulatória acerca dos direitos e deveres dos concessionários e pequenos geradores; insuficiência de regulação em padrões e normas técnicas sobre procedimentos de manutenção adequada numa condição de alta geração distribuída; falta de mão de obra especializada para instalação e manutenção dos painéis FV; falta de informação acerca da aquisição, instalação e operação e benefícios do sistema.

Uma barreira transversal às medidas de efficientização energética decorre da defasagem do Selo Procel para equipamentos pelo Inmetro, já que mesmo a classificação tipo A tem desempenho inferior a outros programas internacionais de etiquetagem. Esse aspecto cria desincentivos ao desenvolvimento de equipamentos de refrigeração, climatização, cocção e iluminação em níveis de eficiência comparáveis aos selos A+ e A++ dos programas Energy Labelling of Household Appliances, da União Europeia, e Energy Star Most Efficient, dos EUA.

Por outro lado, uma série de cobenefícios não quantificados neste estudo poderia alterar o custo de abatimento das medidas, o que justificaria sua implementação. Por exemplo, a efficientização da climatização comercial promove a redução na conta de energia dos empreendimentos, o que permitiria liberar recursos financeiros para a geração de emprego, a qual se reverteria em geração de renda na economia. No caso da efficientização de fogões a GLP, a redução no consumo do combustível fóssil diminuiria as emissões associadas ao transporte dos botijões. Ainda, a implementação de sistemas de aquecimento de solar, em particular em áreas remotas, permitiria a universalização do acesso à energia. E, em linhas gerais, todas as medidas trazem benefícios à saúde humana derivados da diminuição de poluentes.

No âmbito da geração distribuída, podem ser elencados cobenefícios relacionados a: adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição; diminuição da vulnerabilidade dos consumidores perante o aumento das tarifas; maior confiabilidade no suprimento energético; universalização do acesso à energia, entre outros.

O Quadro 6 apresenta barreiras e cobenefícios associados à implementação das diferentes medidas de mitigação avaliadas neste estudo.

Quadro 6 – Barreiras e Cobenefícios à Implementação das Atividades de Baixo Carbono no Setor de Edificações

Medidas (Setor)	Barreiras	Cobenefícios
Efficientização da iluminação (residencial, comercial e serviços)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Ausência de viabilidade econômica no setor residencial; • Defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel; • Desconhecimento dos benefícios da eficiência energética.	• Desenvolvimento científico e tecnológico com vistas à geração de conteúdo local; • Criação de um mercado nacional para LED; • Geração de emprego e renda a partir da redução na conta de energia do setor comercial e de serviços; • Preservação dos recursos naturais; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões.

Medidas (Setor)	Barreiras	Cobenefícios
Eficientização da climatização (residencial, comercial e serviços)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Ausência de viabilidade econômica; • Competição com investimentos alternativos; • Defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel; • Falta de mão de obra especializada para instalação, monitoramento e manutenção de sistemas centralizados de climatização; • <i>Lock-in</i> tecnológico das edificações; • Desconhecimento dos benefícios da eficiência energética.	• Geração de emprego e renda a partir da redução na conta de energia do setor comercial e de serviços; • Criação de um mercado nacional para ar-condicionado mais eficiente; • Preservação dos recursos naturais; • Redução nas emissões de HFC; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões.
Eficientização de geladeiras e <i>freezers</i> (residencial)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Ausência de viabilidade econômica; • Competição com investimentos alternativos; • Defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel; • Desconhecimento dos benefícios da eficiência energética.	• Desenvolvimento científico e tecnológico com vistas à geração de conteúdo local; • Criação de um mercado nacional para geladeiras e <i>freezers</i> mais eficientes; • Preservação dos recursos naturais; • Redução nas emissões de HFC; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões.
Eficientização de fogões a GLP e GN (residencial)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Competição com investimentos alternativos; • Defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel; • Falta de suprimento e volatilidade dos preços do GN; • <i>Lock-in</i> tecnológico das edificações; • Desconhecimento dos benefícios da eficiência energética.	• Desenvolvimento científico e tecnológico com vistas à geração de conteúdo local; • Criação de um mercado nacional para fogões mais eficientes; • Preservação dos recursos naturais; • Diminuição das emissões associadas ao transporte dos botijões a GLP; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões.
Eficientização de aquecedores a GN (residencial)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Competição com investimentos alternativos; • Falta de suprimento e volatilidade dos preços do GN; • Defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel; • <i>Lock-in</i> tecnológico das edificações; • Desconhecimento dos benefícios da eficiência energética.	• Desenvolvimento científico e tecnológico com vistas à geração de conteúdo local; • Criação de um mercado nacional para aquecedores mais eficientes; • Preservação dos recursos naturais; • Geração de emprego e renda associada à instalação e manutenção dos aquecedores; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões.

Medidas (Setor)	Barreiras	Cobenefícios
Eficientização de chuveiros elétricos (residencial)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Ausência de viabilidade econômica; • Competição com investimentos alternativos; • Desconhecimento dos benefícios da eficiência energética; • Defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel; • Esgotamento das possibilidades de efficientização da tecnologia.	• Desenvolvimento científico e tecnológico com vistas à geração de conteúdo local; • Preservação dos recursos naturais; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões.
Substituição de chuveiros elétricos por SAS (residencial)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Ausência de viabilidade econômica; • Falta de mão de obra especializada para a instalação e manutenção dos SAS; • Importação da tecnologia sujeita à volatilidade da taxa de câmbio; • Competição com investimentos alternativos; • Lock-in tecnológico das edificações.	• Adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição; • Preservação dos recursos naturais; • Diminuição da vulnerabilidade perante o aumento das tarifas; • Universalização do acesso à energia; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões.
Eficientização da iluminação pública (público)	• Ausência de viabilidade econômica; • Restrições de orçamento público; • Problema da distribuição dos benefícios, dado pela ausência de incentivo de preço ao agente consumidor; • Desconhecimento dos benefícios da efficientização; • Defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel.	• Geração de excedente no orçamento público; • Melhoria da qualidade da iluminação; • Preservação dos recursos naturais; • Melhoria na saúde pública associada à redução das emissões; • Redução nos índices de criminalidade a partir da melhoria da qualidade de iluminação.
Geração distribuída a partir de painéis FV (residencial, comercial e serviços)	• Dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; • Ausência de viabilidade econômica; • Competição com investimentos alternativos; • Dificuldade para garantir as condições de estabilidade do sistema elétrico; • Importação da tecnologia sujeita à volatilidade da taxa de câmbio; • Lock-in tecnológico das edificações; • Falta de especificação regulatória acerca dos direitos e deveres dos concessionários e pequenos geradores; • Insuficiência de regulação em padrões e normas técnicas sobre procedimentos de manutenção adequada numa condição de alta geração distribuída; • Falta de mão de obra especializada para instalação e manutenção dos painéis FV; • Falta de informação acerca dos benefícios do sistema.	• Adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição; • Diminuição da vulnerabilidade perante o aumento das tarifas; • Maior confiabilidade no suprimento energético; • Aumento da vida útil dos componentes da rede de distribuição; • Menores perdas elétricas; • Redução da expansão das linhas de transmissão e do parque gerador, o que traz menor impacto ambiental; • Aumento da alocação de energia variável sem afetar a estabilidade da rede elétrica; • Universalização do acesso à energia.

Fonte: Elaboração própria

7.2 BREVE AVALIAÇÃO DA EXPERIÊNCIA EM POLÍTICAS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES EM EDIFICAÇÕES

As políticas de mitigação de emissões no setor de edificações podem ser implementadas fazendo-se uso de uma gama de instrumentos. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2015), os instrumentos de política energética implementados em âmbito internacional podem ser classificados segundo diferentes categorias (Figura 180):

- Informação e educação – abrangem medidas designadas para aumentar o grau de conhecimento e a capacitação em relação a medidas de baixo carbono. De fato, parte importante das barreiras de mercado se relaciona a custos de transação associados à capacitação dos agentes e assimetrias de informação. Da mesma forma, instrumentos de certificação de produtos e processos se enquadram nessa categoria de política;
- Econômicos – são instrumentos e medidas que estimulam certas atividades, modificam comportamentos dos agentes econômicos via sinais de preço (por exemplo, incentivo fiscal ou financiamento ou tarifas *feed-in*). Buscam também lidar com os diferentes custos de oportunidade de capital que existem na economia, em grande medida decorrentes das diferentes condições de acesso ao capital (associados também à envergadura dos agentes econômicos). Esses instrumentos incluem financiamento direto, taxas de carbono e mesmo mercados de carbono (associados a quotas e certificados). Neste último caso, referente a mercados de carbono, claro está que não se trata normalmente de uma política setorial, mas de política intersetorial, em que quotas são alocadas entre setores conforme diferentes critérios e há possibilidade de trocas de certificados de emissão entre instalações industriais e/ou energéticas incluídas no mercado de carbono (o chamado *cap-and-trade*);
- Institucionais – consideram a criação de arcabouço institucional capaz de orientar e mesmo apoiar a implementação de determinadas medidas de abatimento de emissões. Exemplos incluem agências de fomento, planos setoriais, órgãos reguladores (por exemplo, para regulação de geração distribuída) etc.;
- Pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) – tratam do apoio ao desenvolvimento tecnológico tanto de medidas inovadoras disruptivas quanto de medidas que dependem de demonstração e do aprendizado tecnológico. Incluem investimento direto, incentivos fiscais, criação de nichos de mercado por meio de compras governamentais etc.;
- Instrumentos regulatórios – são instrumentos de comando e controle que visam definir padrões ou metas de emissão, ou desempenho, em termos de produto ou processo. Exemplos incluem padrões mínimos de eficiência, padrões máximos de emissão, definição de valores mínimos de participação de determinadas opções tecnológicas no portfólio de tecnologias de empresas (por exemplo, participações mínimas de eletricidade decorrente de fontes renováveis nas compras de concessionárias de distribuição de eletricidade) etc. Aqui também se inclui a obrigação de manter e atualizar inventários de emissões atmosféricas. Também se incluem normas técnicas;
- Acordos voluntários – medidas adotadas voluntariamente tanto por órgãos públicos quanto pelo setor privado, seja unilateralmente, seja mediante negociação. No primeiro caso, trata-se normalmente de antecipar-se a mudanças tecnológicas ou mesmo gerar valor para acionista (por exemplo, valor de imagem). No segundo caso, trata-se de aderir a propostas de acordo voluntário para metas específicas (por exemplo, ganhos de produtividade, redução de intensidade de emissão etc.) realizadas por agente público.

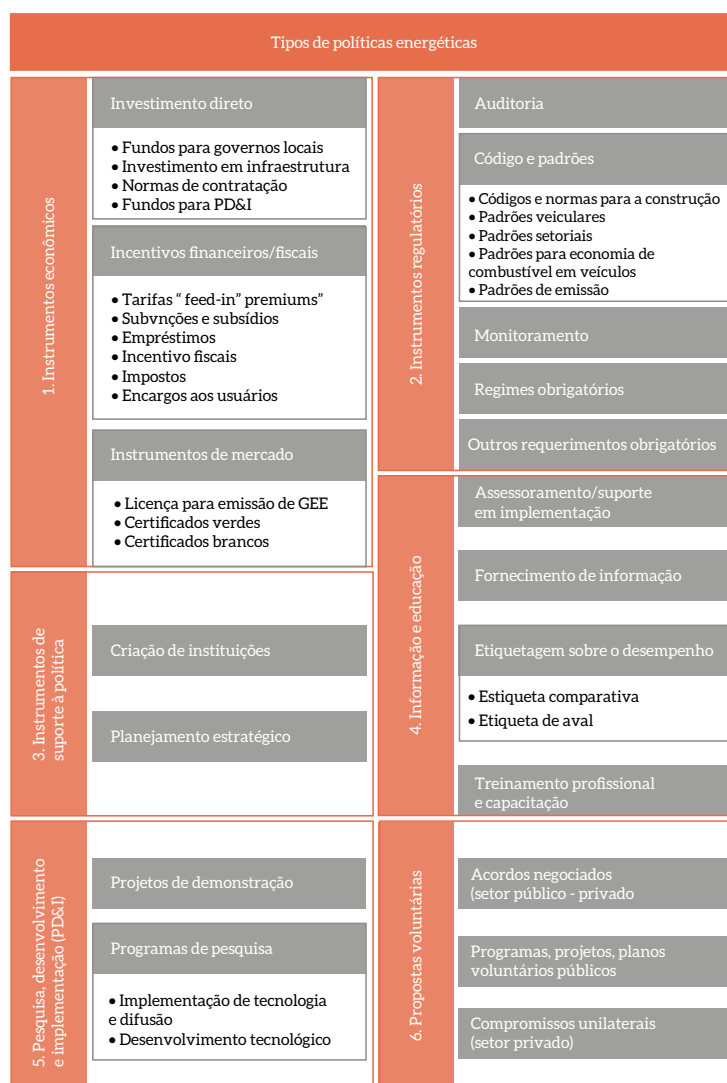


Figura 180 – Classificação dos Instrumentos de Política Pública, segundo IEA (2015)

Fonte: Elaboração própria

Após avaliar as diferentes políticas implementadas nos países analisados, observa-se que todos esses países estabeleceram padrões mandatórios mínimos de eficiência energética para os equipamentos utilizados em edificações. Por exemplo, para destacar, o Japão, com o Top Runner Programme, tem a particularidade de estabelecer um padrão mínimo e cada fabricante pode produzir equipamentos de modo que a eficiência média ponderada dos equipamentos (entre produtos mais ou menos eficientes) seja melhor que o padrão. Isso permite a produção de equipamentos menos eficientes por questões de estratégias industriais e comerciais particulares, como atender o mercado externo.

Ressalta-se, em todos os casos, o papel promotor do governo na criação e no fortalecimento do mercado de equipamentos e serviços que contribuam para a conservação de energia. As diretivas de compras de equipamentos e serviços se constituem como instrumento para melhorar o desempenho

energético em edificações públicas, de modo a incentivar o mercado desses produtos e serviços. No caso particular do Brasil, em 2014, adotaram-se como medida obrigatória padrões mínimos de eficiência energética para prédios públicos (IEA, 2015), porém faz-se necessário o aprofundamento de políticas para edificações eficientes nos demais segmentos.

Apesar da grande diversidade de opções de eficiência energética, em muitos casos, os custos dessas medidas são as barreiras mais importantes a serem superadas (ASTE et al., 2016). Além dos custos, existem outras barreiras não técnicas, relacionadas, por exemplo, com a não uniformidade de regulações entre governos nacionais e locais, mudanças rápidas de requerimentos, incapacidade de atrair investimentos, problemas de gerenciamento etc. (CAPUTO; PASETTI, 2015).

Questões estruturais específicas de cada país devem ser levadas em conta. Por exemplo, Zhang e Wang (2013) pesquisaram as barreiras às políticas de conservação de energia em edificações na China, concluindo que é essencial o estabelecimento de padrões mínimos de eficiência, auferíveis mediante auditorias energéticas, para promover medidas de eficiência energética em edificações do governo.

Destaca-se também a necessidade de boas práticas de informação e coleta de dados sobre consumo de energia e eficiência. Por exemplo, na União Europeia, existe a base de dados Odysse, com dados de eficiência energética e indicadores para cada Estado-membro. Isso permite monitoramento periódico e avaliação do impacto das políticas de eficiência energética implementadas (ALLOUHI et al., 2015). Os estudos realizados pela EIA, dos Estados Unidos, sobre o consumo de energia no setor residencial e comercial em edificações nos Estados Unidos, são uma referência valiosa para outros países (PÉREZ-LOMBARD et al., 2008).

No tocante às políticas relacionadas com envoltório e edificação considerada como um todo (visão mais ampla da edificação), conclui-se que, na União Europeia, é predominante o uso de apoio financeiro. Segundo Economidou e Bertoldi (2014), esse apoio se dá na forma de bolsas e subsídios, seguidos de empréstimos e incentivos fiscais. Nos Estados Unidos, utilizam-se instrumentos econômicos (por exemplo, investimento direto), assim como campanhas de informação e educação (por exemplo, etiquetagem de edificações), para promover a efficientização energética das edificações.

A Figura 181 apresenta a composição porcentual dos tipos de políticas implementados nos países analisados. Incluem-se políticas para eficiência de equipamentos, envoltório e geração distribuída. Salienta-se que apenas nos Estados Unidos e no Japão existem políticas de acordo voluntário. No Brasil, até agora não foi implementada política dessa categoria. Também é importante ver que, percentualmente, o Brasil é o país que mais políticas relacionadas com informação e educação tem, enquanto na China predominam os instrumentos regulatórios. Por fim, vê-se que o Brasil conta com poucos instrumentos regulatórios e econômicos, quando comparado a outros países.

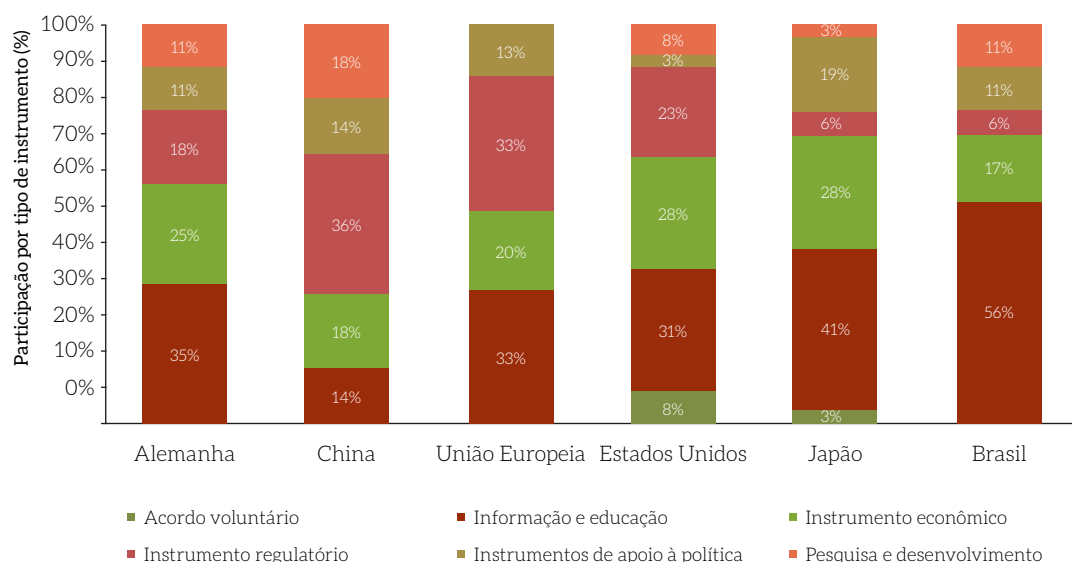


Figura 181 – Percentual de Instrumentos Usados nas Políticas de Eficiência de Equipamentos, da Edificação e Envolvimento em Países Selecionados (% sobre o total de instrumentos)

Fonte: Elaboração própria

7.3 PROPOSIÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA A ADOÇÃO DE ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO PELO SETOR DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL

A avaliação feita sobre as políticas energéticas internacionais indica que há lacunas a serem preenchidas. Não obstante a importância de instrumentos de informação e educação, o foco quase que exclusivo sobre estes em nível nacional limita o potencial de ganhos da eficiência energética em edificações. Assim, de forma a transpor as barreiras identificadas e potencializar a geração de cobenefícios da adoção de medidas que levam a menores emissões de GEE, esta seção propõe uma série de instrumentos adicionais, assim como melhorias nas políticas já existentes no país.

Inicialmente, serão discriminados instrumentos capazes de promover a eficiência energética de equipamentos, abrangendo as seguintes atividades de baixo carbono: eficiência da iluminação; eficiência da climatização; eficiência de geladeiras e *freezers*; eficiência de fogões a GLP e GN; eficiência de fogões a GN; eficiência de chuveiros elétricos. Em seguida, serão propostos instrumentos que permitiriam a eficiência energética da edificação, *per se*, e seu envolvimento. Por fim, serão descritos mecanismos para promover a geração distribuída.

7.3.1 INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EQUIPAMENTOS

Analisando as barreiras existentes para a implementação das medidas de efficientização energética dos equipamentos que utilizam energia no setor residencial, comercial e serviços, propõe-se um conjunto de instrumentos de política pública. Em muitos casos, são produto da análise internacional de políticas energéticas de sucesso.

Inicialmente, a superação das barreiras compreende a manutenção e o fortalecimento dos programas de eficiência energética existentes no Brasil, como os diferentes subprogramas do Procel e a linha de financiamento Finem – Eficiência Energética do BNDES.⁶⁰

Medidas de eficiência energética promovem a conservação dos recursos naturais, que segundo Viana et al. (2012) exigem a difusão de hábitos e usos responsáveis da energia. Para tanto, são necessárias campanhas de informação e educação, as quais podem ser promovidas por meio de selos e padrões de eficiência energética, como é o caso do Selo Procel. No entanto, conforme destacado, mesmo a classificação A tem desempenho inferior a padrões do tipo B e C de programas internacionais. Por esse motivo, é preciso elevar os padrões mínimos de etiquetagem de equipamentos abrangidos pelo Selo Procel, como é o caso de aparelhos de ar-condicionado, aquecedores, fogões, *freezers*, geladeiras e lâmpadas. Logo, propõe-se a revisão dos padrões do selo, com criação das categorias A+ e A++ (*top runner*), que podem tomar como referência os programas Energy Labelling of Household Appliances e Energy Star Most Efficient, da União Europeia e EUA, respectivamente. Compreende-se que a revisão poderia ser implementada no médio prazo, ou seja, a partir de 2020, e deveria ser liderada por Inmetro, Eletrobras e MME.

A partir da revisão do programa de certificação, a linha de financiamento do Finem – Eficiência Energética do BNDES poderia custear, com taxas subsidiadas de juros, a aquisição de equipamentos com a classificação A+ e A++. Esse incentivo permitiria viabilizar a adoção de atividades de baixo carbono pouco atrativas em função da alta taxa de desconto dos setores comercial, residencial e de serviços. Inicialmente, deveria ser criada, pelo BNDES, a linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências”, a qual permitiria o acesso simplificado ao crédito mediante avaliação pelos comerciantes de equipamentos. No caso dos setores comercial e de serviços, o acesso à linha de crédito já existente deve estar condicionado a elaboração e apresentação de estudos de viabilidade técnica e econômica. Futuras concessões de crédito a esse setor estariam condicionadas à apresentação de inventários de emissões de GEE, com intuito de demonstrar benefícios da efficientização energética. Para atores que comprovarem esse benefício, seria oferecida taxa de juros inferior à praticada na primeira operação de crédito. A adoção dessa medida exigiria a mobilização de atores do BNDES, bancos comerciais, rede varejista e Ministério da Fazenda (MF), e sua implementação poderia ocorrer a partir de 2020, estando condicionada a estudos de impactos orçamentários pelo governo no curto prazo (2018 a 2020).

A seguir, são descritos os demais instrumentos de política pública propostos para a efficientização energética de equipamentos nos setores comercial, público, residencial e serviços. Ao final da seção, ter-se-á um quadro-síntese dos instrumentos:

60 Financiamento a partir de R\$ 10 milhões para projetos voltados à redução do consumo de energia e aumento da eficiência energética.

- a) Com intuito de garantir a efficientização da iluminação e climatização no setor público, poderiam ser incluídas diretivas nas licitações com vistas à aquisição de equipamentos apenas enquadrados na categoria A do Selo Procel. Trata-se de instrumento que poderia ser implementado no curto prazo, ou seja, a partir de 2018, com coordenação dos ministérios do Planejamento (MP) e Minas e Energia (MME). A partir da revisão do selo e criação das categorias A+ e A++, o que ocorreria no médio prazo, estas passariam a ser as categorias obrigatórias para aquisição, por meio de licitação, de ar-condicionado e equipamentos de iluminação. Essa política visa superar a barreira da divisão de benefícios, o que reduziria o dispêndio orçamentário e incentivaria o mercado de equipamentos eficientes. Esse instrumento é inspirado nos programas Energy Efficient Products for Government Procurement, da China, e o Law on Promoting Green Purchasing, do Japão.
- b) Para difundir uma cultura de efficientização energética nos setores comercial, público e de serviços, propõe-se a realização de auditorias energéticas. No caso do setor público, esta deveria ocorrer a quatro anos e seria obrigatória. No caso do setor comercial e de serviços, seria critério obrigatório para a liberação de financiamento público de qualquer natureza. Auditoria energética é um instrumento que se propõe a realizar diagnósticos e sugerir medidas de eficiência energética nas empresas/instituições. Mais do que isso, pode direcionar a preparação e submissão de propostas para obtenção de crédito voltado à efficientização energética. Para a difusão desse programa, sugere-se que a informação aos usuários seja divulgada por meio das contas de energia elétrica, onde se indicariam as principais características do programa, números e sítios de interesse para acesso a mais informações. Adicionalmente às reduções de conservação de energia esperadas, esse programa incentivaria o mercado de serviços das Esco. Trata-se de uma política que demandaria a mobilização de representantes setoriais, como Sebrae e Senac, governos estaduais e municipais, e deveria ter a liderança do MME. As auditorias energéticas poderiam ser conduzidas em parceria por universidades públicas, Enap e Sebrae. Essa proposta de instrumento poderia ser implementada a partir de 2020 e se baseia em experiências internacionais, como no Free Energy Audit for Small and Medium Sized Companies, do Japão, e no Energy Consulting in Energieberatung Mittelstand, da Alemanha, assim como na experiência brasileira no setor industrial e com os municípios, com o Procel Indústria e o Procel GEM.
- c) Criação de um concurso anual para incentivar e disseminar iniciativas de sucesso na área da efficientização energética de edificações. A iniciativa seria focada em equipamentos, coordenada pelo MCTIC, e poderia fazer parte da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) de 2018. O concurso teria duas categorias: i) inovação de produtos; ii) caso de sucesso (projeto implementado que, pelos benefícios econômicos e em conservação de energia, tenha potencial de se converter em *benchmarking* e exemplo de boas práticas). Os três primeiros colocados em cada categoria apresentariam as iniciativas na SNCT e em eventos ao longo do ano em estados representativos das cinco regiões do Brasil. Por meio de parcerias com pesquisadores da Rede Clima, parte dos eventos regionais seria dedicada à capacitação acerca de técnicas para avaliação dos benefícios da efficientização energética em edificações. Finalmente, os eventos também abrangeriam a realização de *matchmaking workshop*, o qual reuniria financiadores de projetos, fabricantes de equipamentos e empresas de construção e engenharia, com vistas ao estabelecimento de parcerias que perenizariam boas práticas de eficiência energética em edificações. Esse instrumento é baseado em experiências de sucesso, como o Bright Tomorrow Lighting Prizes (L-Prizes), dos EUA, e o Smart-life Japan Promotional Forum, do Japão.
- d) Desde 2000, a Eletrobras, por meio do Procel Reluz, substituiu cerca de 2,78 milhões de pontos de iluminação pública em todo o Brasil. Na iluminação pública, se realiza a substituição de lâmpadas incandescentes, mistas e a vapor de mercúrio por lâmpadas a vapor de sódio a alta pressão e a vapor metálico. O programa atualmente financia 75% do valor total do projeto. Os 25% restantes constituem a contrapartida dos entes federativos e/ou das concessionárias de energia elétrica. Propõem-se a continuação desse programa e o estabelecimento de metas gradativas de uso da tecnologia LED para a iluminação pública, de forma a equacionar nos custos os ganhos de escala

com os ganhos de curva de aprendizagem mundial da tecnologia. As metas de uso gradativo da tecnologia de LED iniciariam em 10% do total de pontos de iluminação pública substituída em 2018 e subiriam de patamar em 15% até alcançar 100% do total em 2024. Com vistas a incentivar a substituição, o Procel Reluz financiaria 95% do valor total do projeto em 2018, o patamar seria reduzido em 2% anualmente, até alcançar 83% de financiamento em 2024. Mais do que isso, o acesso às condições de financiamento seria condicionado à exigência de metas de conteúdo local de tecnologia LED, o que incentivaria a criação de uma indústria nacional.

- e) Com vistas a remover a barreira relacionada ao trancamento tecnológico das edificações, que impossibilita a adoção de equipamentos (ar-condicionado, fogões e aquecedores a GN) mais eficientes em termos energéticos em edificações existentes, faz-se necessário estabelecer padrões mandatórios na construção civil. No caso, propõe-se que, em 2025, o governo brasileiro instaure a lei de ZEB, a qual entraria em vigor a partir de 2035. Portanto, trata-se de uma medida de longo prazo, que deve ser estabelecida a partir de um amplo diálogo entre atores relevantes, como é o caso do Ministério das Cidades, prefeituras e Conselhos de Engenharia e Arquitetura (CREA) e Arquitetura e Urbanismo (CAU). Sua implementação seria facilitada por meio da criação da exclusividade de financiamento da casa própria, a partir de recursos do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), baseada no conceito de ZEB. Tal aspecto e horizonte de implementação fariam que o setor da construção civil ofertasse esses imóveis aos setores residencial, comercial e de serviços.
- f) No caso da eficientização de fogões e aquecedores a GN, apontou-se a barreira relacionada com a falta de suprimento do energético. Para removê-la, faz-se necessário o estabelecimento de metas às concessionárias de energia relacionadas com ampliação dos gasodutos. Idealmente, propõe-se o atendimento pleno até 2025 de cidades com mais de 1 milhão de habitantes, com a mobilização de órgãos como MME, ANP, concessionárias de energia e prefeituras.
- g) Finalmente, faz-se necessária a criação de programas de capacitação para instalação, monitoramento e manutenção de sistemas centralizados de climatização. Estes poderiam ser criados a partir de parcerias entre Senai, Ministério das Cidades e associações representativas do setor de edificações, que seriam responsáveis por organizar e ministrar os treinamentos. Compreende-se que esse instrumento poderia ser implementado a partir de 2018.

Quadro 7 – Síntese dos Instrumentos de Política Pública Propostos para a Eficientização Energética de Equipamentos

Medidas (Setor)	Instrumentos
Eficientização da iluminação (residencial, comercial e serviços)	• Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel; • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências” para concessão de crédito aos consumidores residenciais por meio da rede varejista; • Taxas decrescentes de juros para acesso ao crédito do Finem para atores dos setores comercial e serviços que apresentem inventários de emissões; • Inserção de critérios obrigatórios em licitações para aquisição de equipamentos enquadrados no Selo Procel A (curto prazo), A+ e A++ (médio prazo); • Realização de auditorias energéticas obrigatórias no setor público e obrigatórias para concessão de financiamento públicos aos setores comercial e de serviços; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações.

Medidas (Setor)	Instrumentos
Eficientização da climatização (residencial, comercial e serviços)	• Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel; • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências” para concessão de crédito aos consumidores residenciais por meio da rede varejista; • Taxas decrescentes de juros para acesso ao crédito do Finem para atores dos setores comercial e serviços que apresentem inventários de emissões; • Inserção de critérios obrigatórios em licitações para aquisição de equipamentos enquadrados no Selo Procel A (curto prazo), A+ e A++ (médio prazo); • Realização de auditorias energéticas obrigatórias no setor público e obrigatórias para concessão de financiamento públicos aos setores comercial e de serviços; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações; • Realização de programas de capacitação para instalação, monitoramento e manutenção de sistemas centralizados de climatização; • Criação e implementação da Lei ZEB a partir de 2035, com financiamento a partir de recursos do FGTS exclusivo para esse tipo de imóvel.
Eficientização de geladeiras e <i>freezers</i> (residencial)	• Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel; • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências” para concessão de crédito aos consumidores residenciais por meio da rede varejista; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações.
Eficientização de fogões a GLP e GN (residencial)	• Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel; • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências” para concessão de crédito aos consumidores residenciais por meio da rede varejista; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações; • Estabelecimento de metas de ampliação dos gasodutos para concessionárias de energia, visando ao pleno atendimento pleno de cidades > 1 milhão de habitantes até 2025.
Eficientização de aquecedores a GN (residencial)	• Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel; • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências” para concessão de crédito aos consumidores residenciais por meio da rede varejista; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações;

Medidas (Setor)	Instrumentos
Eficientização de chuveiros elétricos (residencial)	• Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel; • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências” para concessão de crédito aos consumidores residenciais por meio da rede varejista; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações.
Eficientização da iluminação pública (público)	• Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Realização de auditorias energéticas obrigatórias; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações; • Criação de metas gradativas de substituição de pontos de iluminação por tecnologia LED; • Criação de metas de conteúdo local para concessão de incentivos fiscais relacionados à contrapartida do governo no programa Procel Reluz.

Fonte: Elaboração própria

7.3.2 INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EDIFICAÇÃO E DO ENVOLTÓRIO

Recentemente, o foco nas edificações tem mudado em direção ao desempenho no nível de sistema ou, chamado de outra forma, da edificação considerada de forma mais ampla. Essa preocupação é importante devido ao longo período de vida útil das edificações. Assim, políticas com foco no envoltório das edificações devem ter prioridade, de forma a incentivar que novas construções sejam eficientes do ponto de vista energético. Isso evitaria o *lock-in* em edificações de baixo desempenho energético.

O Brasil precisa contar com mão de obra qualificada para a implementação. A avaliação feita indica que a capacidade e o conhecimento sobre edificações são limitados. Por isso, primeiramente, propõe-se a criação de um programa de treinamento focado em envoltórios eficientes, o qual exigiria a mobilização do Ministério das Cidades, Senai e instituições técnicas ou universitárias existentes. Compreende-se que essa medida poderia ser implementada no curto prazo, ou seja, a partir de 2018.

Com relação aos programas voluntários e códigos mandatórios, observa-se que, no setor de edificações, há poucos projetos de demonstração e, em tal sentido, o impacto poderia não ser duradouro. Isso pode ser refletido no Programa Procel Edifica – Eficiência Energética em Edificações, ao qual a adesão é voluntária. Além disso, observa-se que existem quatro diferentes etiquetas para edificações residenciais: i) Unidade Habitacional Autônoma, incluindo avaliação dos sistemas da envoltória para verão, envoltória para inverno e aquecimento de água; ii) Unidade Habitacional Autônoma, incluindo avaliação dos sistemas da envoltória para verão e aquecimento de água; iii) Edificação Multifamiliar; e iv) Área de Uso Comum, incluindo avaliação de áreas comuns de uso frequente e eventual. Nessa etiqueta, são recebidas bonificações por ventilação natural, iluminação natural, uso racional de água, condicionamento artificial de ar, ventiladores de teto e refrigeradores.

Considerando as etiquetas existentes do Procel Edifica, propõe-se a sua reformulação, em médio prazo, com vistas à criação de etiqueta única de desempenho que deve levar em consideração os seguintes itens de avaliação: ventilação natural; iluminação natural; uso racional de água; condicionamento artificial de ar; ventiladores de teto; e refrigeradores. Esse certificado poderia seguir uma classificação de A até G, conforme acontece na União Europeia, incluindo etiquetas A+ e A++ a partir de 2025. O instrumento de política pública exige a mobilização do Inmetro, Eletrobras e MME.

No caso dos prédios comerciais, públicos e de serviços, apenas a partir de 2014 tornou-se obrigatória a etiquetagem em edificações da administração pública federal direta, autárquica e fundacional (ELETROBRAS, 2017). Na etiqueta concedida pelo Procel aos segmentos comercial, serviços e públicos, são avaliados três sistemas: envoltória, iluminação e condicionamento de ar. A etiqueta pode ser obtida de forma parcial, o que quer dizer que é possível obter uma etiqueta apenas quando são atendidos os requisitos para a envoltória ou quando são atendidos para envoltória e a iluminação simultaneamente, ou quando são atendidos para a envoltória e o sistema de condicionamento de ar.

Nesse sentido, propõe-se uma etiqueta única ou certificação de desempenho energético por segmento que inclua o envoltório e os sistemas de aquecimento, resfriamento, iluminação etc. Além disso, deveria existir um código de construção que estabelecesse padrões mínimos na construção⁶¹ a fim de superar o risco de que os construtores, visando reduzir seus custos, usem materiais pouco indicados no que toca à eficiência energética.

Inexiste, em âmbito nacional, um código de construção para edificações, que consiste em um conjunto de normas estabelecidas a fim de regular os requisitos mínimos de segurança e qualidade nas edificações. O objetivo do código de construção é regular a segurança estrutural e o conforto térmico da edificação. Nesse sentido, propõe-se a formulação de certificados de construção eficiente, assim como para materiais de construção fabricados nacionalmente, com vistas a incentivar o conteúdo local. A implementação do instrumento demanda a mobilização de ministérios, prefeituras, CREA e CAU, podendo ocorrer a partir de 2020.

A fim de garantir o conforto térmico ao interior das edificações do estoque atual, propõe-se o financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para envoltório que promova a efficientização de edificações. O incentivo exigiria a mobilização do MF e bancos de fomento e poderia ser implementado a partir de 2020.

O aperfeiçoamento de programas habitacionais como o Minha Casa Minha Vida estimularia o desenvolvimento de ZEB no Brasil. A segunda fase desse programa de financiamento habitacional estabeleceu como meta que a totalidade dos novos domicílios contemplados pelo programa sejam atendidos por SAS. O aperfeiçoamento do programa incluiria a instalação de outro tipo de tecnologias, tal qual solar fotovoltaica. Além disso, as casas do programa deveriam incluir a obrigatoriedade do

⁶¹ Isso porque existe um risco associado às construtoras vs consumidor de energia. Por um lado, as construtoras não estão preocupadas com os gastos de energia que serão incorridos pelos moradores. Elas querem apenas reduzir seus custos de construção, pois não percebem o benefício da eficiência energética.

uso de materiais para paredes e coberturas com as melhores características de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico contemplado nas diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

No caso do incentivo à substituição de chuveiros elétricos por SAS, são propostos instrumentos similares aos considerados para promover a eficiência energética dos equipamentos utilizados em edificações.

Em seguida, são sintetizados os instrumentos de política pública que devem ser considerados para promover a eficiência energética das edificações e seu envoltório.

Quadro 8 – Síntese dos Instrumentos de Política Pública Propostos para a Eficiência Energética da Edificação e Envoltório

Medidas (Setor)	Instrumentos
Substituição de chuveiros elétricos por SAS (residencial)	• Criação de um programa de treinamento focado na instalação e manutenção de SAS; • Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++ para SAS; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para aquisição de SAS das categorias A+ e A++ do Selo Procel; • Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações; • Realização de atividades regionais de capacitação e <i>matchmaking workshop</i> em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações.
Introdução de ZEB (residencial, comercial e serviços)	• Criação e implementação da Lei ZEB a partir de 2035, com financiamento a partir de recursos do FGTS exclusivo para esse tipo de imóvel; • Criação de um programa de treinamento focado em envoltórios eficientes; • Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++; • Reformulação do Programa Procel Edifica, visando à criação de uma única etiqueta de desempenho que abranja todas as categorias de usos finais de energia no setor; • Elaboração de certificação de construção eficiente e materiais empregados; • Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para envoltório que promova a eficiência energética de edificações; • Aperfeiçoamento do Programa Minha Casa Minha Vida com vistas a contemplar o uso da geração solar fotovoltaica; • Aperfeiçoamento do Programa Minha Casa Minha Vida com vistas a contemplar melhores tecnologias de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico.

Fonte: Elaboração própria

7.3.3 INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA INCENTIVAR A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Políticas para incentivo à geração distribuída fotovoltaica podem ser divididas entre as direcionadas à demanda e à oferta de equipamentos. Segundo Jennings e Casoli (2012), há quatro estratégias gerais de abordagem com o objetivo de impulsionar a tecnologia. A abordagem pelo lado da demanda pode ser mais ou menos agressiva e justificada pela existência ou não de viabilidade econômica

para a tecnologia. Para reduzir barreiras da oferta de equipamentos, pode-se escolher por importar ou produzir. A escolha por um ou outro caminho depende da estratégia escolhida pelo país para se posicionar no futuro em relação ao setor.

Pelo lado da demanda, deve-se criar um ambiente regulatório no país que sustente o setor, de modo a torná-lo transparente e de baixo custo. A regulação local deve reger o acesso à rede de distribuição por parte de geradores distribuídos, assim como definir a regra de intercâmbio da energia gerada. A regulação brasileira já permite esse acesso à rede, regido por um mecanismo de compensação de energia via *net metering*. Soma-se a isso a importância de reduzir barreiras de informação por meio da difusão de benefícios. Segundo Greenpeace (2013), ao fim de 2013, apenas 30% dos brasileiros conheciam algum aspecto relacionado à microgeração. Isso indica que o país ainda carece de ações para informar a sociedade acerca da existência dessa modalidade. Por fim, faz-se necessária a criação de linhas de financiamento para impulsão da modalidade. Programas de empréstimo voltados à aquisição de sistemas fotovoltaicos já se encontram disponíveis no mercado, entretanto as taxas de juros ofertadas parecem ainda não serem suficientes para o real crescimento da tecnologia.

A promoção de geração distribuída via regulamentação, informação e financiamento garantiria ao país sua difusão. A experiência internacional mostra que o desenvolvimento em grande escala é, na maioria dos casos, resultado de políticas contundentes de aporte financeiro para redução de custos. Assim, caso o Brasil opte pelo desenvolvimento rápido no curto prazo, faz-se necessário o aporte direto de recursos. Com esse intuito, o incentivo financeiro mais empregado em todo o mundo são as tarifas prêmio (*feed in tariffs*), cuja eficácia para impulsionar a tecnologia se deve ao bom retorno financeiro em face de outras opções do mercado.

O incentivo direto de recursos demanda a disponibilidade de capital por parte do Estado ou da iniciativa privada. No caso do mecanismo de tarifa prêmio, entretanto, a experiência internacional mostra que esse tipo de incentivo, quando adotado, comumente é custeado pelos usuários finais de energia. Isso permite ao Estado alocar recursos em outros setores, mas pode resultar em insatisfação de parte da população local, pois normalmente se trata de uma contribuição compulsória a todos os usuários. Além disso, pode-se criar uma dinâmica em que usuários de baixa renda estejam financiando sistemas fotovoltaicos em domicílios abastados.

Com vistas a difundir a geração distribuída FV, são propostos os seguintes instrumentos de política pública pelo lado da demanda:

- Criação e expansão de canais de comunicação – objetiva-se criar novos meios para disseminação da tecnologia, como informações acerca dos benefícios da geração distribuída, bem como aspectos relacionados a procedimentos de conexão e custos do sistema. Trata-se de criar área no sítio da Aneel relacionada aos referidos aspectos da geração distribuída, assim como informações relacionadas a fornecedores de mão de obra e painéis FV por estado e municípios. O instrumento poderia ser implementado até 2020, com apoio da Aneel;
- Criação de espaços de compartilhamento de informações – trata-se de criar associações que possibilitem espaços abertos para que os agentes interessados (entidades e agentes do governo; institutos de pesquisa, desenvolvimento e inovação; universidades; indústria de tecnologias de informação e comunicação – TIC, em *hardware*, *software* e equipamentos; e empresas do setor energético) possam compartilhar experiências, opiniões e informações técnicas acerca da geração distribuída.

O instrumento poderia ser implementado até 2020, com apoio do MCTIC, MDIC, bem como de universidades federais e Senai, que seriam responsáveis pela formação técnica;

- Criação e expansão de linhas de financiamento – criação de novos programas de empréstimo, assim como melhoria e redução de custos de transação inerentes aos já existentes. O custo de capital deve ser arquitetado de tal forma que a redução com gastos mensais na conta de energia, resultado da microgeração, seja suficiente para o pagamento da amortização do sistema. Inicialmente, trata-se da criação, junto ao BNDES, de uma linha de financiamento específica para geração distribuída. Mais do que isso, o aprimoramento de programas já existentes pode ser vantajoso, uma vez que já têm alguma difusão no mercado. Por exemplo, a linha de financiamento do Construcard (Caixa) permite a compra de equipamentos apenas a partir de fornecedores cadastrados (normalmente lojas de construção), o que reduz a oferta de equipamentos. Além disso, não há informação precisa acerca dos fornecedores cadastrados, aspectos que exigem a revisão do Construcard. As duas medidas propostas poderiam ser implementadas a partir de 2020 e exigiriam a mobilização dos bancos públicos de fomento e do Ministério da Fazenda;
- Apoio de fundos setoriais existentes – criada pela Lei nº 5.899, de 05/07/1973, a Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) tem o objetivo de ratear os ônus e as vantagens do consumo de combustíveis fósseis, voltado à otimização da operação do sistema elétrico interligado. Posteriormente, no ano de 1993, os sistemas elétricos isolados passaram a ser abrangidos. No ano de 2006, o CCC-interligado foi extinto e o CCC-isolado passou a vigorar até o término dos contratos de compra de energia e/ou da extinção das autorizações e concessões de geração própria localizadas na região. A CCC dos sistemas isolados é recolhida por todos os concessionários do país que atendam consumidores finais. Como, em tese, a introdução de geração distribuída poderá contribuir para a redução de dispêndios da CCC, um plano brasileiro de difusão da tecnologia poderia ser financiado por esse fundo. Trata-se de um instrumento que exige a mobilização do MME, com apoio técnico do MF, e que pode ser implementado a partir de 2020;
- Criação de mecanismo de incentivo via tarifas prêmio – poderia ser criado um programa de tarifas prêmio em que usuários de baixa renda não sejam financiadores do programa. Ainda assim, a aplicação do programa acarretaria aumento dos custos da energia para uma parcela da população, o que pode não ser desejável. Por outro lado, pode-se argumentar que o crescimento fotovoltaico tende a reduzir custos relacionados ao uso de combustíveis em fontes térmicas, o que reduziria o preço final da energia. A medida exigiria a mobilização de MME e Aneel e poderia ser implementada a partir de 2020.

A estratégia pelo lado da oferta apresenta duas possibilidades: importar equipamentos ou produzi-los. A primeira opção é a de menor risco, mas é também a que traria menos ganho econômico ao país. Em um cenário de subsídios e/ou incentivos para a penetração fotovoltaica, o desenvolvimento da tecnologia estritamente por meio de produtos importados, em última análise, resulta no envio de subsídios e/ou incentivos ao exterior. Além disso, ao considerar que a geração distribuída tende a aumentar a tarifa final de eletricidade junto ao consumidor final,⁶² mesmo em cenários de desenvolvimento sem subsídios e/ou incentivos, formar-se-ia o caso em que essa fuga de capital estaria atrelada à perda de bem-estar social de parte da população. De todo modo, caso o foco

62 Quanto maior for o crescimento da geração distribuída, menor será o montante de energia comercializada entre a distribuidora local e o consumidor final. Dado que os custos fixos de operação de uma distribuidora não se modificam com a quantidade de energia vendida, uma maior parcela desses custos deverá ser adicionada à unidade de energia transacionada, agora em menor quantidade. Como resultado, há aumento na tarifa de eletricidade de todos os consumidores, adeptos ou não da tecnologia fotovoltaica. Levando-se em conta que majoritariamente domicílios de alto rendimento devem aderir à tecnologia, tem-se a formação de um subsídio cruzado, em que clientes de baixa renda estariam financiando classes mais abastadas a gerarem sua própria eletricidade.

esteja na importação, o esforço governamental deve se concentrar em melhorar a capacidade de distribuição e instalação do mercado nacional de modo a minimizar custos dessa etapa.⁶³

A escolha por produzir equipamentos nacionais desde os primeiros estágios da cadeia produtiva apresenta maior risco, mas tem potencial econômico interessante. O mercado de equipamentos fotovoltaicos, sobretudo módulos, encontra-se relativamente consolidado e é bastante competitivo. A criação de uma demanda interna constante seria determinante para o desenvolvimento da indústria. Caso a escolha seja por produzir equipamentos, a indústria brasileira deve receber incentivos para o desenvolvimento da atividade. Além de atender ao mercado interno, a região poderia acessar o mercado internacional de uma mercadoria de alto valor agregado e, portanto, desfrutando dos benefícios econômicos dessa atividade.

Atualmente, os últimos estágios da cadeia produtiva já são feitos nacionalmente. As lâminas de silício grau solar ainda são importadas, mas a montagem de módulos é feita no país. Entretanto, é justamente nos estágios iniciais da cadeia onde se encontra o maior valor agregado ao produto final.

Diante desse contexto, são propostos os seguintes instrumentos de política pública para atuação no lado da oferta:

- Capacitação de instaladores e fornecedores – a estratégia brasileira deveria focar na formação de mão de obra especializada em projetos, instalação, operação e manutenção da geração distribuída baseada em sistemas fotovoltaicos. Essa medida permitiria ao país absorver a demanda já existente e prevista no curto prazo. Algumas empresas privadas fornecedoras já vêm promovendo cursos e treinamentos com esse fim, entretanto a medida teria maior alcance caso fosse aplicada pelo Estado por meio de programas de compartilhamento, escolas técnicas e cursos profissionalizantes. Além disso, os custos totais do sistema seriam reduzidos, dado que uma parcela significativa se encontra na fase de instalação. Essa política é de extrema relevância em qualquer estratégia brasileira pelo lado da oferta e poderia ser implementada a partir de 2018, com parcerias entre MCTIC, MDIC, universidades federais e Senai;
- Incentivo à pesquisa e desenvolvimento (P&D) de impactos da geração distribuída – deverão ser destinados recursos para projetos de pesquisa que avaliem impactos das novas tecnologias na rede de transmissão e distribuição de eletricidade. Por exemplo, estudos que determinem como a penetração massiva de geração distribuída impactaria o segmento de distribuição. Além disso, deverão ser investidos recursos em P&D de tecnologias para manutenção da estabilidade da rede e mitigação dos impactos negativos da geração distribuída. Trata-se de instrumentos que exigem a articulação de Aneel, MCTIC e universidades, os quais poderiam ser implementados no curto prazo, ou seja, até 2019. Idealmente, também deveriam envolver a captação de recursos para projetos junto ao Climate Technology Centre and Network (CTCN) e Green Climate Fund (GCF);
- Incentivo a P&D e implementação de planta-piloto de purificação de silício – deve-se fortalecer pesquisa e desenvolvimento da purificação do silício por meio da rota metalúrgica melhorada. Esse movimento aproveitaria a produção já consolidada do silício grau metalúrgico no país. Embora o trabalho seja promissor, encontra-se em nível laboratorial e alguns desafios técnicos com relação ao controle de impurezas ainda não foram resolvidos (RIBEIRO et al., 2013; UNICAMP, 2012). No

63 O eventual aumento do preço de energia para o consumidor final pode ser evitado ou amenizado via manutenção de uma tarifa mínima na conta de eletricidade ou na aplicação de uma tarifa binomial, mesmo para clientes de baixa tensão. Entretanto, nenhuma política foi sugerida no presente estudo de modo a aplacar essa distorção econômica. Entende-se que esta é uma questão conectada à geração distribuída, no entanto não está diretamente relacionada à sua viabilidade no país.

curto prazo, a criação de uma planta-piloto pode ser determinante para o setor.⁶⁴ Deveriam ser mobilizados os mesmos atores e seria aplicável no mesmo horizonte de tempo do instrumento de P&D de impactos da geração distribuída;

- Criação e expansão de certificados de qualidade e padronização – permitiria criar normas e padrões de qualidade para os serviços do setor, sobretudo para instalação, operação e manutenção do sistema. Essa medida permitiria agregar informação de fácil acesso aos consumidores, assim como incentivar fornecedores e instaladores a melhorar ou manter a qualidade de seus serviços. A medida torna o processo mais eficiente e tende a reduzir custos. Mais do que isso, permitiria a operação adequada em uma condição de alta geração distribuída na rede. Atualmente, há iniciativas desse tipo no âmbito da ABNT e Aneel, que precisam ser sistematizadas. Trata-se de um instrumento de curto prazo;
- Incentivo ao estabelecimento da indústria nacional de geração distribuída baseada em painéis FV – o Brasil poderia atuar em uma ou várias etapas de produção de um módulo fotovoltaico, entretanto é a etapa de produção do silício grau solar que apresenta a maior taxa de retorno do setor. Atualmente, a única empresa brasileira atuante no setor é a Tecnometal, justamente na produção de módulos, uma das últimas etapas do processo. Deve-se destacar que a empresa planeja investir na verticalização da cadeia a estágios anteriores, como a produção de *wafers*. No estágio de produção de silício, a empresa RIMA tem apoiado projetos de pesquisa que podem subsidiar essa atividade. O estabelecimento de uma indústria fotovoltaica enfrenta, principalmente, barreiras oriundas do custo de capital e do *know how* tecnológico. A produção do silício grau solar é a operação de maior custo em toda a cadeia produtiva, mas também é onde ocorre a maior agregação de valor. Nesse sentido, é necessária a criação de um ambiente propício à indústria fotovoltaica no país. Essa política se aproveitaria da grande produção de silício grau metalúrgico ou metálico no país,⁶⁵ insumo principal para a obtenção do silício grau solar. Dado o alto custo de capital necessário a novos entrantes e a necessidade de especialização (*know how*) em algumas etapas da cadeia, uma boa estratégia seria iniciar a atuação brasileira no mercado pelos estágios de menor custo.⁶⁶ De todo modo, dada sua complexidade, subsídios referentes à etapa de purificação do silício devem já ser aplicados. A implementação dessa medida poderia ocorrer mediante a realização de *matchmaking workshop*, o qual reuniria financiadores de projetos, fabricantes de equipamentos e empresas de construção e engenharia, com vistas ao estabelecimento de parcerias que incentivassem o desenvolvimento de uma indústria nacional de painéis FV. A atividade poderia ocorrer a partir de 2019 e poderia ser incentivada em parceria entre MDIC, MCTIC, Aneel, financiadoras de projetos e empresas do setor;

64 Esse passo agregaria grande valor ao setor. Enquanto o silício metalúrgico foi comercializado por US\$ 2,00/kg a US\$ 3,00/kg em 2013, o silício grau solar alcançou US\$ 20,00/kg (CARVALHO et al., 2014). De acordo com estudo realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e pela MinasLigas, previu-se que uma planta com produção de 100 toneladas em sua fase piloto teria faturamento anual de US\$ 2,1 milhões a US\$ 2,4 milhões (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2015). Para sustentação dessa estratégia, deve-se destacar o potencial de crescimento da demanda interna, que minimizaria eventuais impactos inerentes à volatilidade do mercado internacional. Uma capacidade incremental de 2 GWp, ao longo dos próximos dez anos, representaria uma demanda brasileira em torno de 12 mil toneladas de silício grau solar. Levando-se em conta o preço médio de US\$ 20,00 a 25,00/kg, formar-se-ia um mercado de US\$ 240 milhões-US\$ 300 milhões e um volume de cerca de 1,2 mil toneladas ao ano (BNDES).

65 O Brasil é o segundo maior produtor global desse material, atrás apenas da China. Aproximadamente 10% do silício metalúrgico produzido mundialmente são direcionados à indústria solar (BNDES).

66 Esse movimento já foi iniciado no país pela empresa Tecnometal, produtora de módulos. Esse caminho é similar ao observado na China, onde a operação teve início nas etapas finais da cadeia e hoje lidera todo o mercado.

- Estabelecimento de regulamentação e normativas técnicas para manter a segurança e confiabilidade do sistema – a integração de geradores distribuídos na rede, sobretudo de origem intermitente, pode impactar a transmissão e a distribuição de energia. Para amenizar esses impactos, a Aneel deve criar regulamentações e normativas técnicas que regem de forma detalhada as condições de acesso à rede e incluam requisitos para a conexão de sistemas de geração renovável, buscando manter a segurança e a confiabilidade do sistema. Trata-se de medida que deve ser implementada no curto prazo na medida em que é crescente a inserção de fontes intermitentes de energia na rede elétrica.

A seguir, apresenta-se um resumo dos instrumentos de política pública propostos para incentivar a geração distribuída.

Quadro 9 – Síntese dos Instrumentos de Política Pública Propostos para Promover a Geração Distribuída

Medidas (Setor)	Instrumentos
Geração distribuída a partir de painéis FV (residencial, comercial e serviços)	• Aprimoramento da linha de financiamento do Construcard (Caixa) com vistas a abranger mais amplo e atualizado cadastro de fornecedores elegíveis de equipamentos de geração distribuída; • Criação, junto ao BNDES, de uma linha de financiamento específica para geração distribuída; • Criação de área no <i>site</i> da Aneel para difusão de informações relacionadas à geração distribuída (benefícios, procedimentos de conexão, custos do sistema, fornecedores de mão de obra e painéis FV por estado e municípios); • Criação de tarifas prêmio em que usuários de baixa renda não sejam financiadores do programa; • Subvenção econômica à geração distribuída por meio da destinação de recursos da Conta de Consumo de Combustíveis dos sistemas isolados (CCC); • Criação de associações para o intercâmbio de experiências, opiniões e informações técnicas acerca da geração distribuída; • Promoção de cursos de formação técnica focados na elaboração de projetos, operação e manutenção de componentes relacionados com a implantação de geração distribuída; • Criação e expansão de certificados de qualidade e padronização para serviços relacionados a sistemas de geração distribuída; • Incentivo a pesquisa e desenvolvimento para avaliação de impactos da geração distribuída na rede de transmissão e distribuição de eletricidade; • Incentivo a P&D e implementação de planta-piloto de purificação de silício; • Realização de mathmaking workshop anual, visando incentivar o estabelecimento de indústria nacional de geração distribuída baseada painéis FV; • Estabelecimento de regulamentação e normativas técnicas para manter a segurança e confiabilidade do sistema.

Fonte: Elaboração própria



Considerações finais

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve por objetivo estimar potenciais e custos de abatimento das opções de mitigação de GEE para o setor de edificações, no período de 2012 a 2050. Objetivou também a proposição de instrumentos de política pública, visando à adoção dos cenários de baixo carbono pelo setor.

Para tanto, a partir de uma linha de base intitulada cenário REF, foram elaborados dois cenários alternativos. No cenário BC, identificou-se um potencial técnico de abatimento de aproximadamente 1,2 bilhão de toneladas de CO₂ acumulado até 2050. Esse potencial equivaleria a uma redução de 42% em relação à trajetória de emissões do cenário REF. No cenário BC+I, identificou-se um potencial técnico de redução no consumo de energia, em 2050, de 45%, que implica redução adicional nas emissões de 7 MtCO₂ para todo o período.

De maneira geral, as atividades de baixo carbono no setor de edificações têm alto custo e potencial de mitigação de emissões limitado. Altas taxas de desconto e baixo fator de utilização das tecnologias contribuíram para esse resultado, que também é impactado pelo baixo fator de emissão do *grid* brasileiro. A maior atratividade das atividades de baixo carbono, em termos de custos, está na efficientização de aquecedores, fogões a GN e a GLP, no setor residencial, e iluminação no setor comercial e serviços.

Em termos de potencial de abatimento acumulado até 2050, é interessante notar que três opções de mitigação respondem por cerca de 73% de todo o potencial acumulado de redução de emissões considerado no estudo. A primeira opção de mitigação em termos de potencial acumulado é a efficientização da climatização, cujo potencial é superior a 500 milhões de toneladas de CO₂ até 2050. A introdução de painéis fotovoltaicos é a segunda opção de abatimento em termos de potencial acumulado, atingindo 219 milhões de toneladas de CO₂ até 2050, com destaque para a região Sudeste, onde o potencial é de 145 milhões de toneladas de CO₂. A terceira principal opção de mitigação é a efficientização de fogões a GLP, que resultou em um potencial de 201 milhões de toneladas de CO₂ até 2050.

Este estudo identificou barreiras à implementação dessas opções de abatimento e propôs instrumentos para superá-las. Quanto à efficientização da climatização, foram identificadas barreiras relacionadas a: i) dificuldade de acesso e custo do crédito para aquisição de equipamentos; ii) ausência de viabilidade econômica; iii) competição com investimentos alternativos; iv) defasagem dos padrões de eficiência do Selo Procel; v) falta de mão de obra especializada para instalação, monitoramento e manutenção de sistemas centralizados de climatização; vi) *lock-in* tecnológico

das edificações; vii) desconhecimento dos benefícios da eficiência energética. Para removê-las, tornando a redução de emissões acumuladas pelas medidas, são propostos os seguintes instrumentos de política pública:

- Revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel e criação das categorias A+ e A++;
- Financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel;
- Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética em Residências” para concessão de crédito aos consumidores residenciais por meio da rede varejista;
- Taxas decrescentes de juros para acesso ao crédito do Finem para atores dos setores comercial e serviços que apresentem inventários de emissões;
- Inserção de critérios obrigatórios em licitações para aquisição de equipamentos enquadrados no Selo Procel A (curto prazo), A+ e A++ (médio prazo);
- Realização de auditorias energéticas obrigatórias no setor público e obrigatórias para concessão de financiamento público aos setores comercial e de serviços;
- Criação do concurso nacional de eficiência energética em edificações;
- Realização de atividades regionais de capacitação e *matchmaking workshop* em tecnologias-chave de baixo carbono aplicáveis ao setor de edificações;
- Realização de programas de capacitação para instalação, monitoramento e manutenção de sistemas centralizados de climatização;
- Criação e implementação da Lei ZEB a partir de 2035, com financiamento a partir de recursos do FGTS exclusivo para esse tipo de imóvel.

Ademais, foram propostos instrumentos que viabilizariam a adoção das demais atividades de baixo carbono relacionadas à efficientização energética de equipamentos, edificações e seu envoltório, e geração distribuída a partir de painéis fotovoltaicos. Destacam-se, em face da transversalidade de aplicação, três instrumentos de política pública: i) revisão dos padrões de eficiência energética do Selo Procel, com a criação das categorias A+ e A++; ii) financiamento a taxas diferenciadas de juros pelo Finem – Eficiência Energética, para equipamentos das categorias A+ e A++ do Selo Procel; iii) criação e implementação da Lei ZEB a partir de 2035, com financiamento a partir de recursos do FGTS exclusivo para esse tipo de imóvel. Esses mecanismos são fundamentais para a transição do setor de edificações para uma economia de baixo carbono.

Este estudo encontrou limitações que devem ser observadas. A interdependência entre as medidas de mitigação e setores é uma limitação do estudo. Trata-se, portanto, de uma análise setorial com detalhamento tecnológico, mas que não considera a relação entre os diferentes setores, ou mesmo entre as diferentes opções de mitigação. Dessa forma, os resultados do custo de abatimento das opções de mitigação, por exemplo, devem ser interpretados com cuidado ao se considerarem diversos setores em cadeia, como é o caso do setor energético. Ademais, o cálculo do custo de abatimento utiliza um potencial técnico que não incorpora restrições de segunda ou terceira ordem que podem inviabilizar a realização do potencial levantado.

O segundo grupo de limitação diz respeito à identificação das principais barreiras e instrumentos de políticas públicas. Neste trabalho, as barreiras foram levantadas de acordo com pesquisa realizada na literatura científica, experiências internacionais e equipe de consultores. Porém, dada a lógica descentralizada de decisões do setor residencial, por exemplo, é de suma importância o levantamento de condições locais e regionais para o aprimoramento da discussão. Portanto, é altamente recomendável a realização de análises sistêmicas em diferentes níveis (nacional, regional e local). Essa melhor descrição das barreiras, automaticamente, deixará claros outros possíveis ganhos com a adoção das medidas, consequentemente, aprimorando o processo de formulação de instrumentos de política pública de baixo carbono.

Cabe destacar que a discussão de possíveis cobenefícios foi realizada de maneira muito breve e merece investigação mais detalhada. Contudo, muitos dos cobenefícios são dependentes de condições locais, o que dificulta sua investigação quando a fronteira de análise é agregada em nível nacional. Consequentemente, com uma melhor descrição da situação dos entraves setoriais e das diversas medidas de abatimento, a seleção de instrumento de ação se tornará muito mais precisa, potencializando sua eficácia para mitigar emissões de GEE.

Há limitações quanto às premissas adotadas, como taxa de desconto e fator de emissão do *grid*. A definição da taxa de desconto é um aspecto crucial para análises de medidas de abatimento de emissões de GEE, sendo de difícil estimação, principalmente para investimentos em eficiência energética no setor residencial, devido a sua heterogeneidade. Da mesma forma, o fator de emissão do *grid* depende da evolução da demanda futura de eletricidade, o que causa circularidade de resultados no modelo. Esse problema, entretanto, é somente resolvido na modelagem integrada, não sendo tratado neste estudo setorial. Nesse sentido, cumpre destacar que, para esse fim, no âmbito do Componente 2 do projeto, encontra-se a modelagem integrada dos cenários, a qual procura superar tais limitações.

Por fim, outra limitação deste estudo resulta das projeções econômicas consideradas na construção dos cenários. Para tratar essa questão, tendo em vista a transversalidade e a relevância das variáveis macroeconômicas para os cenários setoriais de emissões, será considerada uma segunda visão de crescimento setorial do PIB no âmbito da modelagem integrada, a qual considerará os efeitos de curto e médio de prazo do recente contexto econômico nacional.



Referências

REFERÊNCIAS

ADRIA, O.; J, BETHGE. *What users can save with energy-efficient cooking stoves and ovens*. 2013. Disponível em: <http://www.bigee.net/media/filer_public/2014/03/17/appliance__residential_cookingstoves__user_savings__20140220__8.pdf>. Acesso em: 14 set. 2014.

ALLIANZ. *Os painéis “sanduíche” e o risco de incêndio*. 2015. Disponível em: <<https://www.allianz.pt/documents/897980/1080206/Os+Painéis+Sanduíche+e+o+Risco+de+Incêndio.pdf/1acbf177-2bb-4-4b81-81a3-396a1924fbaa>>. Acesso em: 24 maio 2015.

ALLOUHI, A. et al. Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 109, p. 118-130, 2015.

ASLAM BHUTTA, M. M. et al. Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), p. 1926-1939, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO – ABILUX (Brasil). *Conjuntura*. Disponível em: <<http://www.abilux.com.br/portal/conjuntura/1/diagnostico>>. Acesso em: 17 dez. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS CANALIZADO – ABEGÁS (Brasil). *Estatísticas*. Disponível em: <<http://www.abegas.org.br/Site/?tag=estatisticas-2>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FABRICANTES E/OU IMPORTADORES DE PRODUTOS DE ILUMINAÇÃO – ABilumi (Brasil). *Políticas públicas para lâmpadas eficientes*. 2007. Disponível em: <<http://www.abilumi.org.br/eficienciaenergetica.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO – ABRVA (Brasil). *Panorama HVAC-R*. 2014a. Disponível em: <<http://abrava.com.br/?p=2760>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

_____. *Ar-condicionado residencial, evolução no mercado*. Revista Abrava, São Paulo, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SHOPPING CENTERS – ABRASCE. *Números do setor por estado*. 2015a. Disponível em: <<http://www.abrasce.com.br/monitoramento/numeros-do-setor>>. Acesso em: 25 out. 2015.

_____. *Shopping centers no Brasil 2013*. Evolução do Setor. 2015b. Disponível em: <<http://www.abrasce.com.br/monitoramento/publicacoes-de-pesquisas>>. Acesso em: 4 jan. 2015.

ASTE, N. et al. Energy efficiency in buildings: What drives the investments? The case of Lombardy Region. *Sustainable Cities and Society*, 20, p. 27-37, 2016.

AUGUSTUS DE MELO, C.; DE MARTINO JANNUZZI, G. Energy efficiency standards for refrigerators in Brazil: A methodology for impact evaluation. *Energy Policy*, 38(11), p. 6545-6550, 2010.

BARTHEL, C.; GÖTZ, T. What users can save with energy-efficient refrigerators and freezers. 2012. Disponível em: <http://www.bigee.net/media/filer_public/2012/12/04/bigee_doc_1_refrigerators_freezers_user_savings_20121130.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

BIOMASS THERMAL ENERGY COUNCIL – BTEC. *Residential heating*. 2010. Disponível em: <<https://www.biomassthermal.org/resource/PDFs/Fact%20Sheet%203.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Resolução nº 482 – Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências*. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2014.

_____. *Tarifas*. 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifas>>. Acesso em: 7 fev. 2015.

BRASIL. Banco Central do Brasil – BCB. *Histórico das taxas de juros*. 2015. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/?COPOMJUROS>>. Acesso em: 20 jun. 2015.

_____. *Rendimentos nominais brutos das principais aplicações financeiras – Capítulo III – Mercados financeiro e de capitais*. 2013. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pec/Indeco/Port/indeco.asp>>. Acesso em: 31 dez. 2013.

_____. *Resolução nº 3.584 – Fixa a meta para a inflação e seu intervalo de tolerância para o ano de 2010*. 2008. Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2008/pdf/res_3584_v2_L.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

BRASIL. Banco do Brasil – BB. Investimentos – Encontre a melhor opção para aplicar seu dinheiro com segurança. 2015. Disponível em: <http://www.bb.com.br/pbb/pagina-inicial/voce/produtos-e-servicos/investimentos#>. Acesso em: 4 jun. 2015.

BRASIL. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. *Apoio a projetos de eficiência energética – Proesco*. 2005. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/financiamentos>>. Acesso em: 4 jun. 2015.

_____. Taxa de Juros de Longo Prazo – TJLP. 2011. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/taxa-de-juros-de-longo-prazo-tjlp>>. Acesso em: 22 ago. 2015.

BRASIL. Eletrobras-Procel. *Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil*. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso ano-base 2005. Classe residencial-Relatório Brasil. Rio de Janeiro: Eletrobras-Procel, 2007.

BRASIL. Eletrobras. Procel Info – Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. 2017. Disponível em: < <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C}>>. Acesso em: 2 jan. 2017.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Balanço Energético Nacional 2013: Ano-base 2012*. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

_____. *Balanço Energético Nacional 2015: Ano-base 2014*. Rio de Janeiro: EPE, 2015a.

_____. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015: Ano-base 2014*. Rio de Janeiro: EPE, 2015b.

_____. *Balanço Energético Nacional 2016: Ano-base 2015*. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

_____. *Nota Técnica DEA 13/14. Série Estudos de Demanda de Energia*. Demanda de Energia 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2014a.

_____. *Nota Técnica DEA 14/10. Série Estudos de Demanda*. Avaliação de eficiência na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019). Rio de Janeiro: EPE, 2010.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

_____. *Despesa monetária média mensal familiar – valor e distribuição – por classes de rendimento monetário mensal familiar e tipos de despesa*. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

_____. *Leitos por mil habitantes. Séries Históricas e Estatísticas*. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

_____. *Microdados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012a.

_____. *Microdados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2009*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

_____. *Pesquisa Industrial Anual Produto*. Rio de Janeiro: IBGE, 2014a.

_____. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. Pesquisa Básica – 2001 a 2013*. Rio de Janeiro: IBGE, 2014b.

_____. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – 2011*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012b.

_____. *Projeção da população do Brasil por sexo e idade: 2000-2060/Projeção da população das unidades da Federação por sexo e idade: 2000-2030*. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira – INEP. *Sinopses Estatísticas da Educação Básica*. Brasília: INEP, 2015.

_____. *Censo da Educação Superior 2012*: resumo técnico. Rio de Janeiro: INEP, 2014.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. *Portaria nº 489 de 2010* – Aprovar a revisão dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Lâmpadas Fluorescentes Compactas com Reator Integrado à Base. 2010. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001644.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2015.

_____. *Portaria nº 4 de 2011* – Aprovar a revisão dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica. 2011. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001652.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2015.

_____. *Informação ao consumidor*. Tabelas de consumo/eficiência energética. Rio de Janeiro: Inmetro, 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima* – Volume III. 2016a. Disponível em: <<http://www.sirene.mcti.gov.br/publicacoes>>. Acesso em: 30 jan. 2016.

_____. *Fatores de emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil*. 2016b. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/textogeral/emissao_ajustado.html>. Acesso em: 14 mai. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. *Balanco de Energia Útil*. BEU 2005. Disponível em: <http://www.feng.pucrs.br/~eberson/Balan%E7o%20de%20Energia%20%DAtil%202005.pdf>. Acesso em: 18 out. 2014.

_____. *Portaria Interministerial nº 1.007 de 2010* – Aprovar a Regulamentação Específica de Lâmpadas Incandescentes na forma constante dos Anexos I e II à presente Portaria. 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/904396/Portaria_interministerial+1007+de+31-12-2010+Publicado+no+DOU+de+06-01-2011/d94edaad-5e85-45de-b002-f3ebe91d51d1?version=1.1>. Acesso em: 18 maio 2015.

_____. *Plano Nacional de Eficiência Energética*. 2011. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Efici%C3%Aancia+Energ%C3%A9tica+\(PDF\)/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863?version=1.1](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Efici%C3%Aancia+Energ%C3%A9tica+(PDF)/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863?version=1.1). Acesso em: 14 fev. 2014.

_____. *Portaria Interministerial nº 323 de 2011* – Aprovar o Programa de Metas para Condicionadores de Ar na forma constante do Anexo à presente Portaria. 2012. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139097/Portaria_Interministerial_nx_323_2011.pdf/8ea50087-5fd0-4f65-ab23-c95dda53907a>. Acesso em: 18 maio 2012.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços – MDIC. Sistema Aliceweb. Importações. 2014. Disponível em: <<http://alicesweb.mdic.gov.br/>>. Acesso em: 18 out. 2014.

_____. *Portaria nº 73 de 2002* – Instituir, no âmbito do Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade, a etiquetagem compulsória de fogões e fornos a gás de uso doméstico. 2002. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000761.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2015.

BRASIL. Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural – CONPET. *Fogões e Fornos a Gás*. 2014. Disponível em: <<http://consultafofoes.petrobras.com.br/Forms/TabelaConsumo.aspx>>. Acesso em: 31 out. 2014.

_____. *Aquecedores de Água a Gás*. 2015. Disponível em: <<http://consultaaquecedores.petrobras.com.br/Forms/TabelaConsumo.aspx>>. Acesso em: 2 jan. 2015.

BRASIL. Procel/Eletrobras. *Avaliação das instalações de aquecimento solar no Brasil – Sistemas de aquecimento solar no estado do Pará*. (Projeto no ECV 184/2006 Eletrobras/PUC-Minas). Pará: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, Eletrobras, 2010.

_____. *Critérios para a concessão do Selo Procel Eletrobras de economia de energia a televisores cinescópio, LCD, LED, plasma e projeção*. 2008.

_____. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso no setor residencial, 2007a.

_____. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso no setor residencial, 2007b.

CAPUTO, P.; PASETTI, G. Overcoming the inertia of building energy retrofit at municipal level: The Italian challenge. *Sustainable Cities and Society*, 15, p. 120-134, 2015.

CARDOSO, R. B. *Avaliação da economia de energia atribuída ao Programa Selo Procel em freezers e refrigeradores*. 2008. 189 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG, 2008.

_____. *Estudo dos impactos energéticos dos programas brasileiros de etiquetagem energética*: Estudo de caso em refrigeradores de uma porta, condicionadores de ar e motores elétricos. 2012. 145 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia da Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG, 2012.

CARDOSO, R. B. et al. An assessment of energy benefits of efficient household air-conditioners in Brazil. *Energy Efficiency*, 5(3), p. 433-446, 2012.

CARDOSO, R. B.; NOGUEIRA, L. A. H. *Avaliação do impacto energético do uso de lâmpadas fluorescentes compactas no sector residencial brasileiro*. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2008, 16 p.

_____. Estimativa dos impactos energéticos e ambientais atribuída aos coletores solares térmicos nas residências brasileiras. *Revista PCH Notícias & SHP News*, 49, p. 20-24, 2011.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. D.; RÓCIO, M. R. *A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?* Rio de Janeiro: BNDES, 2014.

CASINI, M. Smart windows for energy efficiency of buildings. In: SECOND INTL. CONF. ON ADVANCES IN CIVIL, STRUCTURAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING – ACSEE 2014.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. *Eletrônica orgânica: contexto e proposta de ação para o Brasil*. 2011. Disponível em: www.cgee.org.br/atividades/redirect/7361>. Acesso em: 22 fev. 2015.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO – CRESEB. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos* – Edição revisada e atualizada. 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

CHAGAS, S.V. *Estimativas da curva de carga diária de chuveiros elétricos através de medições e declarações da pesquisa de posses e hábitos de consumo*. 2015. 76 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 2015.

CHINCHILLA, R.; GUCCIONE, S.; TILLMAN, J. Wind power technologies: A need for research and development in improving VAWT's airfoil characteristics. *Journal of Industrial Technology*, 27(1), 2011.

CHRISTINER, M. et al. *Rooftop wind turbine feasibility in Boston, Massachusetts*. Bachelor of Science Thesis. Worcester, Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2010.

DAMBISKI, L. P. *Aplicação do Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente (PROCEL-RELUZ)*. 2007. 79 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Projeto de Graduação, como requisito à conclusão do Curso de Engenharia Elétrica) – Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR, 2007.

DE GOUVELLO et al. *Estudo de baixo carbono para o Brasil*. 2010. Disponível em: <https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2016.

DE LIETO VOLLARO, R. et al. Solar cooling system for buildings: Thermal analysis of solid absorbents applied in low power adsorption system. *Energy and Buildings*, 80, p. 436-440, 2014.

DENG, S.; WANG, R. Z.; DAI, Y. J. How to evaluate performance of net zero energy building – A literature research. *Energy*, 71, p. 1-16, 2014.

DIÁRIO DO COMÉRCIO. *Projeto do IPT obtém silício de alta pureza*. 2015. Disponível em: <[http://www.sindvel.com.br/portico/arquivos/dc\(1\).png](http://www.sindvel.com.br/portico/arquivos/dc(1).png)>. Acesso em: 18 ago. 2015.

E.U. Buildings Performance Institute Europe – BPIE. *Europe's buildings under the microscope: Country-by-country review of the energy performance of Europe's buildings*. 2011. Disponível em: <http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

ECONOMIDOU, M.; BERTOLDI, P. *Financing building energy renovations: Current experiences & ways forward* European Union. Italy: Ed. Ispra, 2014.

ENERGY STAR. Promoting Energy Star's Most Efficient in Energy Efficiency Programs. *Refrigerators/Freezers*. 2014a. Disponível em: <<https://data.energystar.gov/Active-Specifications/ENERGY-STAR-Most-Efficient-Residential-Refrigerato/hgxv-ux9b>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

_____. Promoting Energy Star's Most Efficient in Energy Efficiency Programs. *Boilers*. 2014b. Disponível em: <<https://data.energystar.gov/Active-Specifications/ENERGY-STAR-Most-Efficient-Boilers/vu28-57c3>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

_____. Promoting Energy Star's Most Efficient in Energy Efficiency Programs. *Central Air Conditioners*. 2014c. Disponível em: <https://www.energystar.gov/index.cfm?c=ppg_products.ppg_products_3>. Acesso em: 14 nov. 2014.

ERIKSSON, S.; BERNHOFF, H.; LEIJON, M. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), p. 1419-1434, 2008.

EUROPEAN COMMISSION – E.C. *Towards nearly zero-energy buildings, Definition of common principles under the EPBD*, Final report. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_full_report.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2015.

_____. *Energy labelling of products*. 2014. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/list_of_energy_labelling_measures.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2015.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION – EPIA. *Global Market Outlook – For Photovoltaics 2014-2018*. Brussels, Belgium: EPIA, 2014.

EUROPEAN SOLAR THERMAL INDUSTRY FEDERATION – ESTIF. *Solar thermal cooling and air conditioning*. 2015. Disponível em: <http://www.estif.org/st_energy/technology/solar_thermal_cooling_and_air_conditioning/>. Acesso em: 17 dez. 2015.

FERRARA, C.; PHILIPP, D. Why do PV modules fail? *Energy Procedia*, 15, p. 379-387, 2012.

FERRARA, M. et al. A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 84, p. 442-457, 2014.

GALDINO, M. A. et al. *The Brazilian program for labelling photovoltaic systems*. 2005. Disponível em: <http://www.pucrs.br/cbsolar/pdf/20europeu_brazlab.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

GHISI, E. et al. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. *Energy Policy*, 35, p. 4107-4120, 2007.

GLOBAL ENERGY ASSESSMENT – GEA. *Toward a sustainable future*. Cambridge UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: Cambridge University Press, 2012.

GREENPEACE. *Os brasileiros diante da microgeração de energia renovável*. Report. 2013. Disponível em: <http://104.238.80.142/~ideiasustentavel/wp-content/uploads/2014/02/20131025-Greenpeace-Microgera%C3%A7%C3%A3o-de-Energia-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 16 maio 2015.

GREGGIANIN, C. A. et al. Estudo comparativo entre lâmpadas: Incandescentes, fluorescentes compactas e LED. *Espaço Energia*, 18, p. 51, 2013.

GSÄNGER, S.; PITTELOUD, J. *Small Wind World Report 2014*. Bonn, Germany: New Energy Husum & World Wind Energy Association, 2014.

HADDAD, E. *Projeções de crescimento da economia brasileira*. Projeto Opções de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil. 2015. Disponível em: http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/365685/Apresentacao_publica_dos_Cenarios_Integrados_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Esfufa_para_o_Brasil_ate_2050_Rio_de_Janeiro_27062016.html. Acesso em: 14 jan. 2015.

HAMER, J. *Achieving affordable OLED lighting panels*. 2013. Disponível em: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/hamer-panels_boston2013.pdf. Acesso em: 14 abr. 2014.

HERMELINK, A. et al. Towards nearly zero-energy buildings. *Definition of common principles under the EPBD*. Disponível em: http://www.nezeh.eu/assets/media/fckuploads/file/Reports/2.nzeb_full_report.pdf. Acesso em: 14 maio 2015.

HONG, T. Occupant behavior: Impact on energy use of private offices. ASim 2012 – 1ST ASIA CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, Shanghai, China, 11/25/12-11/27/12. 2014.

HUTTON, S. P. Introduction to the Theory of Flow Machines. By A. BETZ. Pergamon 1966. 281 pp. 75s. Fluid Mechanics of Turbomachinery. By S. L. DIXON. Pergamon, 1966. 213 pp. 25s. Axial Flow Turbines. By J. H. HORLOCK. Butterworth, 1966. 275 pp. 97s. 6d. *Journal of Fluid Mechanics*, 28(4), p. 824-826, 1967.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies. IPCC, 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 28 mar. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Solar heating and cooling*. Paris: IEA, 2012.

_____. *Technology roadmap: Hydrogen and fuel cells*. Paris: IEA, 2015. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Technology roadmap. Energy efficient building envelopes*. Paris: IEA, 2013a. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyEfficientBuildingEnvelopes.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Technology roadmap*. Energy storage. Paris: IEA, 2014. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Technology roadmap*. Energy-efficient buildings: Heating and Cooling Equipment. 2011. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-energy-efficient-buildings-heating-and-cooling-equipment.html>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Transition to sustainable buildings*. Strategies and opportunities to 2050. Paris: IEA, 2013b. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Building2013_free.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

JAISANKAR, S. et al. A comprehensive review on solar water heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), p. 3045-3050, 2011.

JENNINGS, T.; CASOLI, A. *Distributed generation policy framework & UK lessons learnt* – Executive summary, London: Carbon Trust – Funded by British Embassy to Empresa de Pesquisa Energética, 2012.

KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A. European smart cities: The role of zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 15, p. 86-95, 2015.

KILKIS, S. *A new metric for net-zero carbon buildings*. Proceedings of ES2007. Energy Sustainability, 2007. Long Beach, California, p. 219-224

LACCHINI, C.; DOS SANTOS, J. C. V. Photovoltaic energy generation in Brazil – Cost analysis using coal-fired power plants as comparison. *Renewable Energy*, 52, p. 183-189, 2013.

LAMBERTS, R. et al. *Desempenho térmico de edificações*. 2016. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf. Acesso em: 18 out. 2016.

LAUTSEN, J. *Energy Efficiency Requirements in Building Codes*. 2008. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Building_Codes.pdf>. Acesso em: 14 set. 2015.

LUCON, O. et al. Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O. et al. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

MALMQUIST, B. D.; SBAR, N. The benefits of dynamic glazing. July 2013. Disponível em: <http://42mzqz26jebqf6rd034t5pef-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2013/09/Benefits-of-Dynamic-Glazing_SAGE-Sponsored.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

MCKINSEY & CO. *Lighting the way: Perspectives on the global lighting market*. 2012. Disponível em: <https://www.mckinsey.de/files/Lighting_the_way_Perspectives_on_global_lighting_market_2012.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

MELO, C. A.; JANNUZZI, G. M.; TRIPODI, A. F. Evaluating public policy mechanisms for climate change mitigation in Brazilian buildings sector. *Energy Policy*, 61, p. 1200-1211, 2013.

MESQUITA, L. C. S. *Eficiência de coletores solares e comparações entre tubos evacuados e coletores planos*. Relatório Técnico 1, Novembro de 2013. São Manuel, SP: Universidade do Sol, 2013. Disponível em: <<http://www.universidadedosol.org.br/wp-content/themes/esntv2016/publicacoes-tecnicas/Relatorio-0001.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

MIRANDA, R. F. C. *Análise da inserção de geração distribuída de energia solar fotovoltaica no setor residencial brasileiro*. 2013. 309 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MIRANDA, R. F. C.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Technical-economic potential of PV systems on Brazilian rooftops. *Renewable Energy*, 75, p. 694-713, 2015.

MITSCHER, M.; RÜTHER, R. Economic performance and policies for grid-connected residential solar photovoltaic systems in Brazil. *Energy Policy*, 49, p. 688-694, 2012.

MOCELIN, A. R.; ZILLES, R.; NOVGORODCEV, A. *Programa brasileiro de etiquetagem: a utilização do simulador solar do IEE/USP na qualificação de módulos fotovoltaicos*. 2008. Disponível em: <http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/1335/1/2008_MocelinZilles.pdf.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

MORISHITA, C. *Impacto do regulamento para eficiência energética em edificações no consumo de energia elétrica do setor residencial brasileiro*. 2011. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

MOURA, P. S. *Hidrogénio e células de combustível*. s.l. Instituto de Sistemas e Robótica – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/406/12/14_ANEXO_Pilhas%20de%20combust%C3%ADvel_BA_REV3.pdf>. Acesso em: 15 set. 2014.

NATIONAL ASSOCIATION OF HOME BUILDERS/BANK OF AMERICA HOME EQUITY – NAHB/Bank of America. *Study of life expectancy of home components*. Washington, DC: NAHB/Bank of America, 2007.

NOGUEIRA, L. A. H. et al. Evaluation of the energy impacts of the Energy Efficiency Law in Brazil. *Energy for Sustainable Development*, 24, p. 58-69, 2015.

OLIVEIRA, A. D. *A análise de custos entre coletores solares quanto a aspectos construtivos*. 2014. 89 f. Monografia de Pós-graduação (Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos) – Universidade Federal de Santa Maria, Novo Hamburgo, 2014.

PANESI, A. R. Q. *Eficiência Energética em Supermercados*. 2º Encontro de Engenharia e tecnologia dos Campos Gerais, 14 e 15 de agosto de 2008. Disponível em: <http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/anais/artigos/eng_elet_automacao/18%20EFICIENCIA%20ENERGETICA%20EM%20SUPERMERCADOS.pdf>. Acesso: 30 set. 2015.

PEREIRA, C. D.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. *Nota técnica referente aos níveis mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar no Brasil*. Florianópolis: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, 2013.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. DE. Urban energy consumption mapping for energy management. *Energy Policy*, 59, p. 257-269, 2013.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), p. 394-398, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES/CEPEL/CRESESB), 2014.

POPE, K.; DINCER, I.; NATERER, G. F. Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, 35(9), p. 2102-2113, 2010.

RAHMAAN, A. U. *The imperatives of urban and regional planning: Concepts and case studies from the developing world*. Boston: Xlibris, 2011.

REDEMET. Sistema de geração e disponibilização de informações climatológicas. 2014. Disponível em: <<http://clima.icea.gov.br/clima/>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

RENEWABLE UK. *Small and medium wind strategy* – The current and future potential of the sub-500kW wind industry in the UK. London, United Kingdom, 2014. Disponível em: <https://c.ymcdn.com/sites/www.renewableuk.com/resource/resmgr/Docs/small_medium_wind_strategy_r.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Small and medium wind UK market report*. London, United Kingdom, 2013. Disponível em: <http://uk.windspot.es/dirimagenes/e57423_final_ruk13-013_small_medium_wind_market_report.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

RIBEIRO, T. R.; MARTORANO, M. DE A.; FERREIRA, J. B. *Remoção de carbono contido no silício metálico por decantação de carbonetos para produção de silício grau solar*. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, 10(4), p. 303-310, 2013.

RODRÍGUEZ-UBINAS, E. et al. Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. *Energy and Buildings*, 83, p. 10-22, 2014a.

_____. Energy efficiency evaluation of zero energy houses. *Energy and Buildings*, 83, p. 23-35, 2014b.

SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), p. 2262-2289, 2011.

SAMANEZ, C. P. *Gestão de investimentos e geração de valor*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

SARTORI, I.; NAPOLITANO, A.; VOSS, K. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, p. 220-232, 2012.

SCHAEFFER, R. et al. *Energia e pobreza: problemas de desenvolvimento energético e grupos sociais marginais em áreas rurais e urbanas do Brasil*. Serie Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile: CEPAL, 2003.

SCHUMPETER, J. *Teoria do desenvolvimento econômico*. Uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico. São Paulo: Nova Cultural, 1997.

SINDICATO NACIONAL DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO – SINDIGÁS. *Estatísticas*. Disponível em: <http://www.sindigas.org.br/novosite/?page_id=3015>. Acesso em: 10 ago. 2015.

SMITH, J. et al. *Built-Environment Wind Turbine Roadmap*. Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2012.

SUN, Y.; HUANG, P.; HUANG, G. A multi-criteria system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties. *Energy and Buildings*, 97, p. 196-204, 2015.

TELECO. *Estatísticas do Brasil: Geral*. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/estatis.asp>>. Acesso em: 18 abr. 2015.

THE COLLABORATIVE LABELING AND APPLIANCE STANDARDS PROGRAM – CLASP. *Cooling benchmarking study report*. 2011. Disponível em: <<file:///Users/registrathmann/Downloads/RAC%20benchmarking%20-%20Report.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

THE INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. Solar photovoltaics – Technology brief. Abu Dhabi, United Arab Emirates: Energy Technology Systems Analysis Programme/International Renewable Energy Agency, 2013.

THEJOKALYANI, N.; DHOBLE, S. J. Novel approaches for energy efficient solid state lighting by RGB organic light emitting diodes – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, p. 448-467, 2014.

TOPTEN.EU. Click your way to energy savings. Euro-Topten Max 2012-2014 Report. 2015. Disponível em: <http://www.topten.eu/uploads/File/Etop%20Max/Euro-Topten%20Max%202012-14%20report.pdf>. Acesso em: 15 maio 2015.

TORCELLINI, P. et al. *Zero Energy Buildings: a critical look at the definition*. 2006. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2015.

TORGAL, F. P. et al. *Nearly Zero Energy Building Refurbishment: A multidisciplinary approach*. London: Springer, 2013.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP. Grupo purifica silício para fabricação de células solares. *Jornal da Unicamp*, p. 2, 2012.

ÜRGE-VORSATZ, D. et al. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, p. 85-98, 2015.

USA. American Wind Energy Association – AWEA. *U.S. small wind turbine market report*. 2011. Disponível em: <<https://deq.mt.gov/Portals/112/Energy/EnergizeMT/Renewables/Documents/Wind/AWEASmallWindReport2011.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2015.

USA. Department of Energy – DOE. *Energy savings potential and RD&D opportunities for non-vapor-compression HVAC technologies*. 2014a. Disponível em: <<https://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/Non-Vapor%20Compression%20HVAC%20Report.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Solid-State Lighting R&D Plan*. 2015. Disponível em: <https://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f22/ssl_rd-plan_may2015_0.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Solid-State Lighting Research and Development*. Multi-Year Program Plan. 2014b. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *The role of energy storage in commercial buildings: A preliminary report*. 2010. Disponível em: <http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19853.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

USA. Energy Information Administration – EIA. *Annual Energy Outlook 2014*. 2014a. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2014).pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. LED bulb efficiency expected to continue improving as cost declines. *Today in Energy*. 2014b. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=15471>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

_____. *Trends in Lighting in Commercial Buildings*. 2013. Disponível em: <[https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2012/lighting/?src=%E2%80%B9%20Consumption%20%20%20Commercial%20Buildings%20Energy%20Consumption%20Survey%20\(CBECS\)-b1](https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2012/lighting/?src=%E2%80%B9%20Consumption%20%20%20Commercial%20Buildings%20Energy%20Consumption%20Survey%20(CBECS)-b1)>. Acesso em: 22 abr. 2015.

_____. RSE tabelas for building characteristics for non-mall buildings. Washington, DC: EIA, 2008.

VALOR ECONÔMICO. *Valor Data*. 2015. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/valor-data/>>. Acesso em: 8 jun. 2015.

VIANA, A. N. C. et al. *Eficiência energética: Fundamentos e aplicações*. 1. ed. Campinas: Elektro/ Universidade Federal de Itajubá/Excen/Fupai, 2012.

WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE – WBDG. *Fuel cells and renewable hydrogen*. 2015. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/fuelcell.php>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

WORLD ENERGY COUNCIL/FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – WEC/FAO. *The challenge of rural energy poverty in developing countries*. Londres, Roma: WEC/FAO, 1999.

ZHANG, Y.; WANG, Y. Barriers' and policies' analysis of China's building energy efficiency. *Energy Policy*, 62, p. 768-773, 2013.

