



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

FERNANDO NASCIMENTO COSTA

**Índices Mínimos de Eficiência Energética e
Uso de Fluido Refrigerante de Baixo *GWP*
em Condicionadores de Ar Tipo *Split* no
Brasil**

CAMPINAS
2021

FERNANDO NASCIMENTO COSTA

Índices Mínimos de Eficiência Energética e Uso de Fluido Refrigerante de Baixo *GWP* em Condicionadores de Ar Tipo *Split* no Brasil

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientadora: Profa. Dra. Ieda Geriberto Hidalgo
Coorientador: Prof. Dr. Gilberto De Martino Jannuzzi

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO(A) ALUNO FERNANDO NASCIMENTO COSTA, E ORIENTADA PELA PROF(A). DR(A) IEDA GERIBERTO HIDALGO.

CAMPINAS
2021

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C823i Costa, Fernando Nascimento, 1984-
Índices mínimos de eficiência energética e uso de fluido refrigerante de baixo GWP em condicionadores de ar tipo split no Brasil / Fernando Nascimento Costa. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Ieda Geriberto Hidalgo.
Coorientador: Gilberto de Martino Jannuzzi.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Eficiência energética. 2. Aquecimento global. 3. Políticas públicas. 4. Ar condicionado. 5. Fluidos refrigerantes. 6. Avaliação do ciclo de vida. 7. Mercado de emissão de carbono. I. Hidalgo, Ieda Geriberto, 1976-. II. Jannuzzi, Gilberto de Martino, 1955-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Minimum energy performance standard and use of low GWP refrigerant in split air conditioners in Brazil

Palavras-chave em inglês:

Energy efficiency
Global warming
Public policy
Air conditioner
Refrigerant fluids
Life cycle cost assesement
Carbon emission market

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Ieda Geriberto Hidalgo [Orientador]
Kamyla Borges da Cunha
Luis Ariovaldo Fabri
Vivaldo Silveira Junior
Waldemir Silva de Lima

Data de defesa: 24-09-2021

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**Índices Mínimos de Eficiência Energética e
Uso de Fluido Refrigerante de Baixo *GWP*
em Condicionadores de Ar Tipo *Split* no
Brasil**

Autor: Fernando Nascimento Costa

Orientadora: Profa. Dra. Ieda Geriberto Hidalgo

Coorientador: Prof. Dr. Gilberto De Martino Jannuzzi

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Ieda Geriberto Hidalgo

**Departamento de Energia/ Faculdade de Engenharia Mecânica/ Universidade
Estadual de Campinas (UNICAMP)**

Profa. Dra. Kamyla Borges da Cunha

**Coordenadora da Iniciativa de Eficiência Energética do Instituto Clima Sociedade
(iCS)**

Prof. Dr. Luiz Arioaldo Fabri Junior

Faculdade de Tecnologia/ Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Junior

**Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos/ Faculdade de Engenharia
de Alimentos/ Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**

Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima

Departamento de Engenharia/ Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 24 de Setembro de 2021

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa Samara Venâncio, aos meus filhos, Luis Fernando e Maria Luísa, aos meus pais Custódio Barbosa e Conceição de Maria e aos meus irmãos Watson e Deydson.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de pessoas especiais que contribuíram direta ou indiretamente, aos quais presto minha homenagem:

Primeiramente a Deus pela vida e pelas oportunidades a mim concedidas.

À minha orientadora Ieda Geriberto Hidalgo e meu coorientador, Gilberto De Martino Jannuzzi, que me mostraram os caminhos a serem seguidos.

Ao International Energy Initiative - Brasil pelo apoio financeiro, incluindo o suporte dado durante minha estadia no *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)*.

Aos familiares e amigos pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

À secretária do Departamento de Planejamento de Sistemas Energéticos, Cleusa de Vasconcelos Lima.

Aos amigos Virginie, Rodolfo, Gabrielle, Cristiane e Sara que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da UNICAMP e PSE, sempre solícitos.

A Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade concedida para a realização do Programa de Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos - PSE.

Resumo

Os Índices Mínimos de Eficiência Energética (IMEE) são indicadores de políticas públicas que estabelecem requisitos obrigatórios de desempenho energético antes da comercialização de produtos elétricos. Os condicionadores de ar tipo *split* apresentam alto consumo de energia. Ademais, os fluidos refrigerantes que circulam no interior destes equipamentos apresentam elevado potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential - GWP*) e são fontes de poluição ambiental.

Para condicionadores de ar tipo *split* no setor residencial brasileiro, este trabalho avalia os impactos na implementação de IMEE mais restritivos em conjunto com a transição para os fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP*. Tomando como referência um condicionador de ar representativo com capacidade de 12.000 *BTU/h* (3,51 kW), os impactos são avaliados sob a perspectiva dos consumidores, fabricantes e em nível nacional.

O procedimento de análise está dividido em três etapas. Na primeira (Estudo de Caso I), três cenários de eficiência energética são simulados para avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos em condicionadores de ar tipo *split*. Na segunda etapa, cinco fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP* são avaliados para substituir o atual R-410A. Na terceira (Estudo de Caso II), após a escolha do fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP*, novas simulações de IMEE mais restritivos, agora em conjunto com o fluido refrigerante de baixo *GWP* escolhido são realizadas.

O modelo *Policy Analysis Modeling System (PAMS)* é empregado como ferramenta para avaliação dos impactos de IMEE mais restritivos. O índice *Total Equivalent Warming Impact (TEWI)* é aplicado para análise da transição de fluidos refrigerantes de baixo *GWP*.

Sob a perspectiva dos consumidores, os IMEE mais restritivos e os fluidos refrigerantes de baixo *GWP* apresentam uma economia no custo de ciclo de vida (CCV) de R\$ 2.165,00 com um *payback* inferior a um ano. Para os fabricantes, o Fluxo de Caixa Livre (FCL) no ano de 2035 aproxima-se de R\$ 350 milhões. Em nível nacional, a economia de energia atinge cerca de 200 TWh, acumulados até 2035.

Os resultados também demonstram que IMEE mais restritivos e a transição para fluidos refrigerantes de baixo *GWP* são mecanismos de elevado potencial econômico e de conservação de energia, bem como para a redução das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE).

Palavras Chave: Eficiência Energética, IMEE, *GWP*, Condicionadores de Ar.

Abstract

Minimum Energy Performance Standard (*MEPS*) are public policies mechanisms that provide minimum requirements of energy performance before commercialization of the electric products. Split air conditioners have a high energy consumption. Furthermore, the refrigerants that move inside these appliances have high Global Warming Potential (*GWP*) and are source of environmental pollution.

To *split* air conditioners in the Brazilian residential sector, the present study assesses the impacts in implementing of more restrictive *MEPS* in combination with the transition to alternative low *GWP* refrigerants. Take into account a 12,000 *BTU/h* (3.51 kW) representative air conditioner the impacts are evaluated from the consumers, manufacturers and the national perspectives.

The analysis procedure is divided into three stages. In the first (Case Study I), three energy efficiency scenarios are simulated to assess the impacts of more restrictive *MEPS* in split air conditioners. In the second stage, five low *GWP* alternative refrigerants are evaluated to replace the current R-410A. In the third (Case Study II), following the choice of the low *GWP* refrigerant, new simulations of more restrictive *MEPS* now along with the low *GWP* refrigerant selected are carried out.

The Policy Analysis Modeling System (*PAMS*) model is used as tool to assess the impacts due to more restrictive *MEPS*. The Total Equivalent Warming Impact (*TEWI*) index is applicable to examine the transition of low *GWP* refrigerants.

From the consumer perspective, the more restrictive *MEPS* and low *GWP* refrigerants show a Life Cycle Cost (LCC) economy of R\$ 2.165,00 with payback period less than one year. In 2035, to manufactures, the Free Cash Flow (FCF) approaching of R\$ 350 million. At a national level, the 2035 accumulate energy savings reaches close to 200 TWh.

The results also demonstrate that more restrictive *MEPS* and the transition to low *GWP* refrigerants are mechanisms of high economic an energy potential savings, as well as to reduce the greenhouse gases (GHG) emissions.

Key Word: Energy Efficiency, *MEPS*, *GWP*, Air Conditioning.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1. Etiqueta do PBE para condicionadores de ar.	27
Figura 2.2. Evolução dos programas de etiquetagem em condicionadores de ar no Brasil..	28
Figura 2.3. Condicionador de ar tipo janela (parede) e <i>split</i>	31
Figura 2.4. Segmentação do consumo de eletricidade.....	33
Figura 2.5. Etapas para a definição ou atualização dos IMEE..	34
Figura 2.6. Exigência dos IMEE e participação de mercado global.....	37
Figura 2.7. Projeção dos IMEE em condicionadores de ar na Índia..	37
Figura 2.8. Cenários para mitigação dos GEE..	43
Figura 3.1. Probabilidade de sobrevivência em condicionadores de ar.....	53
Figura 3.2. Difusão dos condicionadores de ar para o setor residencial.	61
Figura 3.3. Projeção das vendas de condicionadores de ar.	62
Figura 3.4. Carga média de fluido refrigerante.	64
Figura 4.1. Análise do <i>CCV</i> e economia no <i>CCV</i>	68
Figura 4.2. <i>FCF</i> com <i>IMME</i> entrando em vigor em 2021.	69
Figura 4.3. Evolução do consumo anual de energia elétrica.	70
Figura 4.4. Economia anual de energia elétrica.....	71
Figura 4.5 Economia de custos para o cenário 3 ₍₁₎	73
Figura 4.6. Evolução do estoque dos condicionadores de ar no Brasil.	74
Figura 4.7. Índice <i>TEWI</i> para fluidos refrigerantes.	75
Figura 4.8. Emissões diretas e indiretas de CO ₂	78
Figura 4.9. Preço do equipamento x eficiência energética para o Estudo de Caso II.....	84
Figura 4.10. Impactos econômicos para os consumidores.	86
Figura 4.11. <i>FCL</i> com <i>IMEE</i> + R-32 entrando em vigor em 2021.	87
Figura 4.12. Consumo anual de energia elétrica.	88
Figura 4.13. Economia anual de energia elétrica.....	89
Figura 4.14. Economia de energia acumulada para o ano de 2035.	90
Figura 4.15. Redução na demanda de pico de carga.	91
Figura 4.16. Economia de energia na fonte de geração.....	92
Figura 4.17. Redução acumulada das emissões de CO ₂	92

Figura 4.18. Economia de custos para o cenário 3 _(II)	93
Figura 4.19. Evolução do <i>FCL</i>	97
Figura 4.20. Consumo anual de energia elétrica.	98
Figura 4.21. Capacidade de geração evitada.	99
Figura 4.22. Economia de energia na fonte de geração.	101
Figura 4.23. Economia de energia acumulada na fonte de geração.	101
Figura 4.24. Redução nas emissões de CO ₂	102
Figura 4.25. Redução das emissões acumuladas de CO ₂	103
Figura 4.26. Impactos diretos pelo uso do R-32 para os novos equipamentos.	104

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Mecanismos de promoção de eficiência energética.....	26
Tabela 2.2. Projeção para as novas classes de eficiência e IMEE.....	30
Tabela 2.3. Mercado de condicionadores de ar (2019) e fluidos refrigerantes.	43
Tabela 2.4. Impactos para os consumidores, fabricantes e em nível nacional.	32
Tabela 2.5. Fluidos refrigerantes alternativos de baixo <i>GWP</i>	42
Tabela 3.1. Dados de Engenharia <i>LBNL</i>	57
Tabela 3.2. Participação de mercado para o Estudo de Caso I.....	58
Tabela 3.3. Dados de entrada para análise de impactos para os consumidores e em nível nacional.....	60
Tabela 3.4. Parâmetros de regressão para difusão de condicionadores de ar no Brasil.	60
Tabela 3.5. Dados de entrada para análise de impactos para os fabricantes.	63
Tabela 3.6. Custos para os fabricantes na implementação de eficiência energética.	63
Tabela 3.7. Variação da eficiência energética e da carga de fluido refrigerante.....	64
Tabela 3.8. Dados de entrada para a contabilidade do índice <i>TEWI</i>	65
Tabela 4.1. Análise de impactos para os consumidores.	67
Tabela 4.2. Análise da viabilidade econômica para os fabricantes.	69
Tabela 4.3. Impactos energéticos para IMEE mais restritivos.	71
Tabela 4.4. Impactos ambientais para IMEE mais restritivos.	72
Tabela 4.5. Impactos econômicos em nível nacional.	73
Tabela 4.6. Variação do consumo unitário de energia e da carga de fluido refrigerante ...	75
Tabela 4.7. Análise de fluidos refrigerantes pelo índice <i>TEWI</i>	76
Tabela 4.8. <i>TEWI</i> total em função dos condicionadores de ar vendidos.....	78
Tabela 4.9. Dados de engenharia para o Estudo de Caso II (IMEE + R-32).....	84
Tabela 4.10. Parâmetros médios de mercado para o Estudo de Caso II (IMEE + R-32)...	85
Tabela 4.11. Análise dos impactos para os consumidores.	85
Tabela 4.12. Viabilidade econômica para os fabricantes.	87
Tabela 4.13. Parâmetros de mercado para os Estudos de Caso I e II.	94
Tabela 4.14. Impactos para os consumidores.	95
Tabela 4.15. Despesas para os fabricantes.	96
Tabela 4.16. Receitas para os fabricantes.....	96

Tabela 4.17. Economia de energia acumulada.	99
Tabela 4.18. Economia no pico de carga.	100
Tabela 4.19. Economia acumulada de pico de carga.	100
Tabela 4.20. Economia de energia na fonte de geração.	102
Tabela 4.21. Economia nas emissões de CO ₂	103
Tabela 4.22. Benefícios financeiros para o ano de 2035.	105

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABT	Avaliação Baseada em Teoria
AHRI	<i>Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute</i>
AREP	<i>Alternative Refrigerant Evaluation Program</i>
BAU	<i>Business As Usual</i>
BUENAS	<i>Bottom Up Energy Analysis System</i>
CEE	Coeficiente de Eficiência Energética
CFC	Clorofluorcarboneto
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
CLASP	<i>Collaborative Labeling and Appliance Standards Program</i>
CNE	Consumo de Energia Nacional
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
DOU	Diário Oficial da União
EE	Eficiência Energética
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i>
EIR	Estudo de Impacto Regulatório
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESCO	<i>Energy Service Company</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HCFC	Hidroclorofluorcarboneto
HFC	Hidrofluorcarboneto
HFO	Hidrofluorolefinas
ICS	Instituto Clima e Sociedade
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEI	<i>International Energy Initiative</i>
IMEE	Índices Mínimos de Eficiência Energética
ISEER	<i>Indian Seasonal Energy Efficiency Ratio</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>

<i>LCC</i>	<i>Life Cycle Cost</i>
<i>LCCP</i>	<i>Life Cycle Climate Performance</i>
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
<i>MEPS</i>	<i>Minimum Energy Performance Standard</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
<i>MS</i>	<i>Market Share</i>
Mt	Mega Tonelada
<i>Mtoe</i>	<i>Million Tonnes of Oil Equivalent</i>
NO ₂	Óxido Nitroso
ONU	Organização das Nações Unidas
<i>PAMS</i>	<i>Policy Analysis Modeling System</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PFC	Perfluorcarbono
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SDO	Substâncias Destruidoras do Ozônio
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
<i>SEER</i>	<i>Seasonal Energy Efficiency Ratio</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
<i>TEWI</i>	<i>Total Equivalent Warming Impact</i>
<i>UEC</i>	<i>Unit Energy Consumption</i>
VEE	Válvula de Expansão Eletrônica
<i>VRF</i>	<i>Variable Refrigerant Flow</i>

Lista de Símbolos

α	Saturação
α_r	Fator de Recuperação
AE	Ativos Encalhados
β	Fator de Emissão Indireta
β_G	Fator Global de Emissão Indireta de CO ₂
β_1	Coefficiente de Regressão Linear de Urbanização
β_3	Coefficiente de Regressão Linear de Clima
CCC	Custos de Conversão de Capital
CCE	Custos de Conversão de Equipamentos
CCV	Custo de Ciclo de Vida
CG	Capital de Giro
CO	Custos Operacionais
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2-e}	Dióxido de Carbono Equivalente
ΔP	Variação do Preço do Equipamento
ΔO	Variação dos Custos Operacionais
DC	Despesas de Capital
DG	Despesas Gerais
$D(i)$	Desvio Médio das Idades de Substituição
dif	Difusão
DR	<i>Discount Rate</i>
DR_N	<i>National Discount Rate</i>
DR_I	<i>Industry Discount Rate</i>
DVAG	Despesas de Vendas Administrativas e Gerais
ECE	Economia de Custos de Equipamentos
ECO	Economia de Custos Operacionais
EEN	Economia de Energia Nacional
EEP	Economia de Energia na Fonte Primária
eff	Eficiência
FC	Fluxo de Caixa

FC_B	Fator de Carbono
FCL	Fluxo de Caixa Livre
FD	Fator de Desconto
fCO_2	Fator de Emissão de CO ₂
HR	<i>Heat Rate</i>
HH	Números de Habitantes por Família
i	Idade do Equipamento
I	Custo de Instalação do Equipamento
L	<i>Lifetime</i>
LAJI	Lucros Antes de Juros e Impostos
LOLAI	Lucros Operacionais Líquidos Após os Impostos
L_v	Taxa de Vazamento Anual
m	Massa de Fluido Refrigerante
M	Custo de Manutenção do Equipamento
ML	Margem de Lucro
ML_D	Margem de Lucro dos Canais de Distribuição
n	Ano
P	Preço de Energia Elétrica
PA	Preço de Compra do Condicionador de Ar
PC	Primeiras Compras
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
pop	População
PS	Probabilidade de Sobrevivência
PV	Preço de Vendas dos Fabricantes
R	Receitas
Rf	Renda das famílias
RG	Custo de Recarga de Fluido Refrigerante do Equipamento
RPC	Redução na Demanda de Pico de Carga
$Reff$	Taxa Anual de Incremento de Eficiência
$RECO_2$	Redução das Emissões de Dióxido de Carbono
SUB	Substituições
$S(y,i)$	Quantidade de Equipamentos no Ano (y) e idade (i)
TD	Perdas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica

TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
TI	Taxa de Impostos
VPCE	Valor Presente de Economia nos Custos de Equipamentos
VPEE	Valor Presente de Economia de Energia
VPL	Valor Presente Líquido
VPLI	Valor Presente Líquido para a Indústria
VT	Valor Terminal
γ	Coefficiente de regressão linear
γ_{CDD}	Coefficiente de regressão linear (<i>CDD</i>)
y_f	Ano Considerado
y_0	Ano de Referência

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Contexto Geral.....	20
1.2 Motivação e Objetivos.....	22
1.3 Estrutura do Trabalho	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 Eficiência Energética.....	30
2.2 Considerações Gerais sobre os Condicionadores de Ar	30
2.3 Estudos sobre IMEE	34
2.4 Estudos sobre Fluidos Refrigerantes	42
3 METODOLOGIA.....	48
3.1 Modelo <i>PAMS</i>	48
3.1.1 Perspectiva dos Consumidores	48
3.1.2 Perspectiva dos Fabricantes.....	49
3.1.3 Previsão de Estoque Nacional	51
3.1.4 Perspectiva Nacional	54
3.2 Índice <i>TEWI</i>	56
3.3 Desenvolvimento e Implementação das Premissas	56
3.3.1 Desenvolvimento dos Cenários para o Estudo de Caso I.....	57
3.3.2 Dados de Entrada - Perspectiva dos Consumidores e em Nível Nacional	58
3.3.4 Dados de Entrada - Perspectiva dos Fabricantes	62
3.3.5 Dados de Entrada - Análise do Índice <i>TEWI</i>	63
4 RESULTADOS	66
4.1 Estudo de Caso I - Análise de Impactos dos IMEE.....	66
4.1.1 Consumidores	66
4.1.2 Fabricantes.....	68

4.1.3 Nacional.....	70
4.2 Análise das emissões de CO ₂ pelo índice <i>TEWI</i>	74
4.2.1 <i>TEWI</i> Segundo o Estoque Nacional.....	77
4.2.2 Mecanismos Adicionais de Eficiência Energética em Condicionadores de Ar	80
4.3 Estudo de Caso II - Análise de Impactos IMEE + R-32	83
4.3.1 Consumidores	85
4.3.2 Fabricantes.....	86
4.3.3 Nacional.....	88
4.4 Análise Comparativa entre os Estudos de Caso I e II.....	93
4.4.1 Consumidores	94
4.4.2 Fabricantes.....	95
4.4.3 Nacional.....	98
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
5.1 Estudo de Caso I - IMEE mais Restritivos	106
5.2 Fluidos Refrigerantes de Baixo <i>GWP</i>	108
5.3 Estudo de Caso II - IMEE mais Restritivos e Fluido Refrigerante de Baixo <i>GWP</i> .	109
5.4 Sugestões para Trabalhos Futuros	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO A - <i>Bins</i> de Temperatura e Condições de Ensaios.....	119
ANEXO B - O Brasil e o Protocolo de Montreal e Kyoto	120
ANEXO C - Metas de redução dos HFCs	123
ANEXO D - Comparativo entre o R-410A e R-32	124
ANEXO E - <i>Check-List</i> : Instalação Condicionadores de Ar.....	126
ANEXO F - <i>Check-List</i> : Manutenção Condicionadores de Ar	127

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo está dividido em três seções. Na primeira, o contexto geral para o desenvolvimento desta tese é apresentado. Na segunda seção, a motivação e os objetivos principais são definidos. Na terceira, a estrutura e a organização da tese são apresentadas.

1.1 Contexto Geral

Os IMEE são indicadores que estabelecem o desempenho mínimo energético dos produtos elétricos, restringindo a venda dos equipamentos que apresentam níveis de eficiência energética inferiores ao padrão exigido. Os IMEE quando bem implementados apresentam benefícios sob diferentes perspectivas, principalmente naqueles equipamentos de elevado consumo energético e alta demanda, como os condicionadores de ar tipo *split*.

Com o objetivo de contribuir com uma base sólida na adoção dos IMEE mais efetivos em condicionadores de ar tipo *split*, o Instituto Clima e Sociedade (ICS), no âmbito do Projeto Kigali, o *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)*, o *International Energy Initiative Brazil (IEI)*, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEE) e o Mitsidi Projetos desenvolveram uma força tarefa para avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos no Brasil. Este projeto, com início em 2018 e término em 2019, resultou no desenvolvimento de um guia que apresenta as diretrizes gerais para a implementação dos IMEE mais restritivos. Trata-se de um estudo piloto no Brasil cujo foco é avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos sob diferentes perspectivas. Os procedimentos na implementação dos IMEE mais restritivos foram validados através de um estudo de caso para os condicionadores de ar tipo *split*, considerando os setores residencial e comercial brasileiros.

O estudo de caso consiste na análise dos impactos dos IMEE mais restritivos sob a perspectiva dos consumidores, fabricantes e em nível nacional. Durante o desenvolvimento do trabalho, a ausência dos dados para executar o modelo *Policy Analysis Modeling System (PAMS)* foi um obstáculo encontrado. Este problema foi solucionado em grande parte pelo Mitsidi Projetos que empenhou-se em coletar os dados necessários para a implementação do modelo.

O *PAMS* é um modelo robusto e de fácil aplicação que auxilia os formuladores de políticas públicas de eficiência energética na avaliação dos benefícios dos IMEE mais restritivos. É importante destacar que há versões do modelo *PAMS* de domínio público e privado. A versão utilizada na força tarefa, bem como nesta tese é uma versão privada, com

trade mark LBNL. O modelo apresenta uma abordagem *bottom-up* (de baixo para cima) para estimar os custos e os benefícios na implementação de produtos mais eficientes. O *PAMS* contabiliza os potenciais impactos energéticos, ambientais e financeiros que auxiliam na tomada de decisão na implementação de IMEE mais rigorosos para diversos produtos em mais de 150 países. A precisão das estimativas dos impactos pode ser melhorada à medida que dados mais consistentes são coletados e inseridos no modelo.

Diante deste cenário geral, esta tese busca dar continuidade ao projeto descrito anteriormente, atualizando os dados obtidos e refinando o estudo de caso para o setor residencial, uma vez que há divergências significativas no perfil de uso dos condicionadores de ar tipo *split* nos setores residencial e comercial. Ademais, dentro do contexto da Emenda de Kigali, que estabelece um cronograma para a redução do consumo dos hidrofluorcarbonetos (HFCs), o autor sentiu a necessidade de avaliar também a influência do fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* que substituirá o atual HFC R-410A. Assim, esta tese apresenta uma abordagem inovadora, cujo objetivo é avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos em conjunto com a introdução dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP*.

Para atingir este objetivo desenvolveu-se esta tese, tendo como ponto de partida as análises outrora desenvolvidas. Alguns dados de entrada para executar o modelo *PAMS* são os mesmos obtidos pela força tarefa, como por exemplo os dados para a análise de impactos sob a perspectiva dos fabricantes. Os dados para avaliar os impactos sob a perspectiva dos consumidores e em nível nacional foram atualizados e aprimorados para considerar o estudo de caso proposto (setor residencial brasileiro). Ademais, no modelo *PAMS* foram realizadas adequações para contabilizar a influência do fluido refrigerante de baixo *GWP* em conjunto com os IMEE.

O *TEWI* é um índice que contabiliza os impactos de aquecimento global devido ao uso dos condicionadores de ar. Os impactos são avaliados pelas emissões dos GEE e são calculados durante a operação do equipamento ao longo de sua vida útil. O índice *TEWI* compara os efeitos das emissões dos GEE em condicionadores de ar e pode ser utilizado como indicador para selecionar o fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP*.

A tese está dividida em três etapas. A primeira, consiste na aplicação do modelo *PAMS* considerando o setor residencial brasileiro. A segunda etapa seleciona, através do índice *TEWI*, o fluido refrigerante de baixo *GWP* mais adequado para substituir o atual HFC R-410A. Após a escolha do novo fluido refrigerante, os impactos em termos de emissões de CO₂ são avaliados, considerando a antecipação da Emenda de Kigali nos condicionadores de ar para o ano de 2021.

A terceira etapa avalia os impactos dos IMEE mais restritivos, considerando a participação relacionada ao fluido refrigerante de baixo *GWP* escolhido.

1.2 Motivação e Objetivos

O uso dos condicionadores de ar no setor residencial tem apresentado um grande crescimento nos últimos anos no Brasil. Com o aumento da renda das famílias e da elevação global da temperatura, estima-se que a posse destes aparelhos aumentará nos próximos anos. Reduzindo o consumo energético destes equipamentos, benefícios para os consumidores, fabricantes e em nível nacional podem ser obtidos. Uma das maneiras mais eficazes para reduzir o consumo energético nos condicionadores de ar é com o estabelecimento de IMEE mais restritivos (EPE, 2018).

Adicionalmente, a Emenda de Kigali estabelece que os fluidos refrigerantes de alto *GWP* devem ser progressivamente eliminados do mercado, atingindo uma redução de 80% até o ano de 2045. Os condicionadores de ar são grandes consumidores destas substâncias. Novos fluidos refrigerantes estão em fase de implementação e testes. O aumento no uso dos condicionadores de ar acarretará um impacto sobre o setor elétrico e também nas emissões dos GEE. Dentro deste contexto, o aumento da eficiência energética pela elevação dos IMEE, em paralelo com a transição para fluidos refrigerantes de baixo *GWP*, apresentam uma grande oportunidade para minimizar os impactos ambientais pelo uso destes equipamentos.

Esta tese tem três objetivos principais. O primeiro consiste em atualizar os resultados obtidos pela força tarefa referente aos impactos dos IMEE mais restritivos em condicionadores de ar tipo *split*, considerando o setor residencial brasileiro. O segundo tem por fim selecionar o fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* mais adequado para substituir o atual R-410A. O terceiro consiste em quantificar os impactos dos IMEE mais restritivos incorporando a parcela devida à transição para o fluido refrigerante de baixo *GWP*. Para atingir estes objetivos, esta tese está dividida em três partes: (1) Estudo de Caso I (referencial), (2) análise do fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* e (3) Estudo de Caso II.

A análise do Estudo de Caso I consiste em:

- Avaliar os impactos, em termos de Custo de Ciclo de Vida (*CCV*) e *payback*, para os consumidores;

- Investigar os impactos, em termos de Valor Presente Líquido para Indústria (*VPLI*) e Fluxo de Caixa Livre (*FCL*), para os fabricantes;
- Estimar a Economia de Energia Nacional (*EEN*); a Economia de Energia na Fonte Primária (*EEP*); a Redução das Emissões de *GEE* (*RECO₂*); e o potencial financeiro através de Valor Presente Líquido (*VPL*).

Referente ao fluido refrigerante, a análise corresponde a:

- Selecionar, através do índice *TEWI*, o fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* mais adequado para substituir o atual R-410A;
- Estimar os impactos diretos e indiretos, em termos de redução das emissões de *CO₂*, pela transição do novo fluido refrigerante.

No Estudo de Caso II, após a escolha do fluido refrigerante alternativo, a análise consiste em:

- Avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos, considerando a participação relativa ao uso do fluido refrigerante de baixo *GWP* escolhido e comparar estes resultados com o Estudo de Caso I.

1.3 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 apresentou o contexto geral para o desenvolvimento desta tese, a motivação e os objetivos a serem atingidos, dentro do contexto do Projeto Kigali, bem como a estrutura geral do texto. A apresentação dos demais capítulos é descrita a seguir.

O capítulo 2 contextualiza a eficiência energética e os programas de etiquetagem no cenário nacional. Uma descrição dos tipos de condicionadores de ar e o diagnóstico de mercado dos condicionadores de ar é também apresentada. Em seguida, uma revisão bibliográfica relacionada aos IMEE e aos fluidos refrigerantes de baixo *GWP*, dentro do contexto da Emenda de Kigali é desenvolvida. Por fim, experiências na implementação destes mecanismos, bem como os benefícios alcançados são discutidos.

O capítulo 3 descreve o modelo *PAMS* e o índice *TEWI* utilizados para a análise prospectiva. O modelo de projeção do estoque dos condicionadores de ar é também apresentado, bem como os parâmetros para a criação do cenário de referência (Estudo de Caso I) e os métodos referentes à avaliação dos impactos. Por fim, as premissas adotadas para a coleta dos dados de entrada são também descritas.

O capítulo 4 inicia com a aplicação do modelo *PAMS* para o Estudo de Caso I considerando as perspectivas contempladas. A seguir, o fluido refrigerante de baixo *GWP*

substituto ao atual R-410A é avaliado, assim como os impactos ambientais devido a transição deste fluido alternativo nos novos condicionadores de ar. Após a escolha do novo fluido refrigerante de baixo *GWP*, o modelo *PAMS* é aplicado para o Estudo de Caso II, o qual consiste em avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos em conjunto com o fluido refrigerante de baixo *GWP* escolhido. Finalmente, uma análise comparativa entre os Estudos de Caso I e II é apresentada com o objetivo de avaliar a contribuição referente a implementação do fluido refrigerante de baixo *GWP*.

O capítulo 5 apresenta as conclusões, as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, as referências bibliográficas e os anexos utilizados para o desenvolvimento desta tese são apresentados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta os referenciais teóricos que contribuem para o desenvolvimento desta tese e está dividido em quatro seções. Na primeira, um contexto geral sobre eficiência energética é apresentado. Na segunda seção, considerações referentes aos condicionadores de ar são realizadas. Na terceira, estudos relacionados aos IMEE são apresentados. De maneira similar, na quarta seção trabalhos sobre os fluidos refrigerantes em condicionadores de ar são discutidos.

2.1 Eficiência Energética

Mecanismos para a promoção e conservação de energia têm surgido em vários países para reduzir o consumo energético e as emissões dos GEE. A eficiência energética ganha destaque dentre estes mecanismos. A eficiência energética consiste em utilizar de maneira racional a energia disponível, sendo classificada em duas categorias, a saber, pelo lado da oferta e demanda. A eficiência energética pelo lado da demanda é a categoria que apresenta o maior potencial de economia (JANNUZZI *et al.*, 2018).

Bajay *et al.* (2018) pontua que a eficiência energética é um elemento fundamental para o desenvolvimento sustentável e que deve ser promovido o uso racional dos recursos energéticos. Os autores estimam que para cada 1kWh economizado, não se deixa de gerar o mesmo 1kWh na usina, mas 1,1 kWh, levando em consideração 11,5% de perdas de energia, das quais 4% ocorrem na transmissão e 7,5% na distribuição.

A maior vantagem da eficiência energética pelo lado da demanda consiste no fato de que ela é quase sempre mais econômica que pelo lado da oferta. Na maioria dos casos, investir em tecnologias eficientes para diversos usos finais requer maiores custos de capital. Equipamentos mais eficientes normalmente são mais caros que as tecnologias que as substitui. Entretanto, o custo de conservação de 1kWh é geralmente inferior ao custo de produção (JANNUZZI & SWISHER, 1997). Dentre os principais mecanismos de eficiência energética voltados para o lado da demanda, destacam-se os programas de etiquetagem.

Os programas de etiquetagem consistem na fixação de selos que informam o desempenho energético dos equipamentos para que os consumidores optem por produtos mais eficientes e ambientalmente corretos (WIEL & MCMAHON, 2005). Os principais tipos

de etiquetas são as de endosso e as classificatórias. As etiquetas de endosso identificam os equipamentos que, a partir de determinados critérios, são classificados como os mais eficientes. As etiquetas classificatórias separam os modelos de produtos por diferentes categorias e por níveis de eficiência energética.

Outros mecanismos para promoção de eficiência energética também se destacam, alguns dos quais são apresentados na Tabela 2.1. Fatores econômicos, históricos e culturais de cada país são aspectos fundamentais que determinam a viabilidade na implementação destes programas. É particularmente importante apresentar alguns destes programas de incentivos, pois podem servir como modelos a serem copiados pelos países em desenvolvimento.

Tabela 2.1. Mecanismos de promoção de eficiência energética.

Mecanismo	Descrição
Controle	Eficiência energética pelo lado da demanda
	Planejamento integrado de recursos
	Gerenciamento de carga como alternativa para expansão da rede
	Códigos e padrões de eficiência energética
Fundo	Fundo público para eficiência energética
	Financiamento no mercado de eletricidade
Suporte	Treinamentos para profissionais
	Centros de energia
	Organizações com enfoque em energia
	Criação de <i>Energy Service Companies (ESCOs)</i>
	Associações industriais
Mercado	Impostos sobre a energia
	Redução de taxas e incentivos para eficiência energética
	Etiquetagem do desempenho energético
	Contratos de desempenho energético
	Fornecimento de energia competitivos
	Redução pelo lado da demanda
	Sistemas de negócios para redução das emissões de GEE

Fonte: Adaptado de Melo (2009).

No Brasil, a experiência em eficiência energética teve início em 1981, com a criação do programa CONSERVE. Este programa tinha por objetivo promover a conservação de energia no setor industrial, desenvolver produtos eficientes e substituir a importação de recursos energéticos por fontes nacionais. Em 1982, o programa de Mobilização Energética desenvolveu um conjunto de ações de incentivos à conservação de energia, particularmente na substituição de derivados de petróleo por fontes alternativas (MME, 2011).

Em 1984 o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) promoveu uma discussão com a sociedade sobre conservação de energia com o intuito de contribuir com o racionamento energético no país. Os consumidores foram informados sobre

a eficiência energética dos produtos e foram estimulados a adquirirem equipamentos de maneira mais consciente (VIANA *et al.*, 2012).

Em 1985, os Ministros de Estado das Minas e Energia e da Indústria e do Comércio promulgaram a Portaria Interministerial nº 1.877 do Ministério de Minas e Energia (MME) e do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), que implementou o Programa Nacional de Conservação de Energia (PROCEL). O PROCEL promove o uso racional de energia elétrica no país e dentre suas iniciativas se destacou a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

O PBE oferece informações que permitem avaliar o consumo energético dos equipamentos, orientando os consumidores na seleção de produtos mais eficientes. As etiquetas do PBE (classificadoras) identificam os produtos por níveis de eficiência energética, conforme mostra a Figura 2.1. Os produtos são ensaiados em laboratórios e etiquetados com uma classificação que varia atualmente de A até D, nos quais os equipamentos de classe A são mais eficientes que os de classe B, e assim por diante. Os equipamentos de classe A são contemplados com o selo PROCEL, o qual informa aos consumidores que, dentro de uma determinada categoria, estes equipamentos são os mais eficientes. Informações adicionais como o fornecedor, a marca, o modelo, o tipo de equipamento e o consumo mensal em kWh são também contemplados nas etiquetas classificatórias.

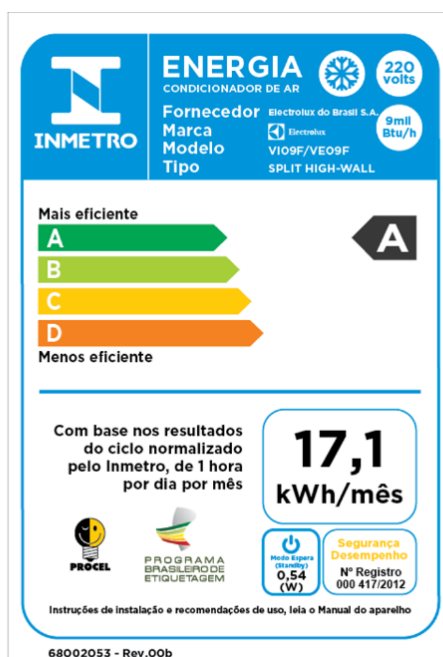


Figura 2.1. Etiqueta do PBE para condicionadores de ar.

As etiquetas de eficiência energética no Brasil estão bem consolidadas. No entanto, para os condicionadores de ar, o atual PBE não está promovendo o surgimento de equipamentos de alta eficiência, uma vez que os critérios para que um condicionador de ar tipo *split*, por exemplo, seja classe A, manteve-se praticamente inalterado durante os últimos anos, conforme mostra a Figura 2.2 (PROJETO KIGALI, 2019).

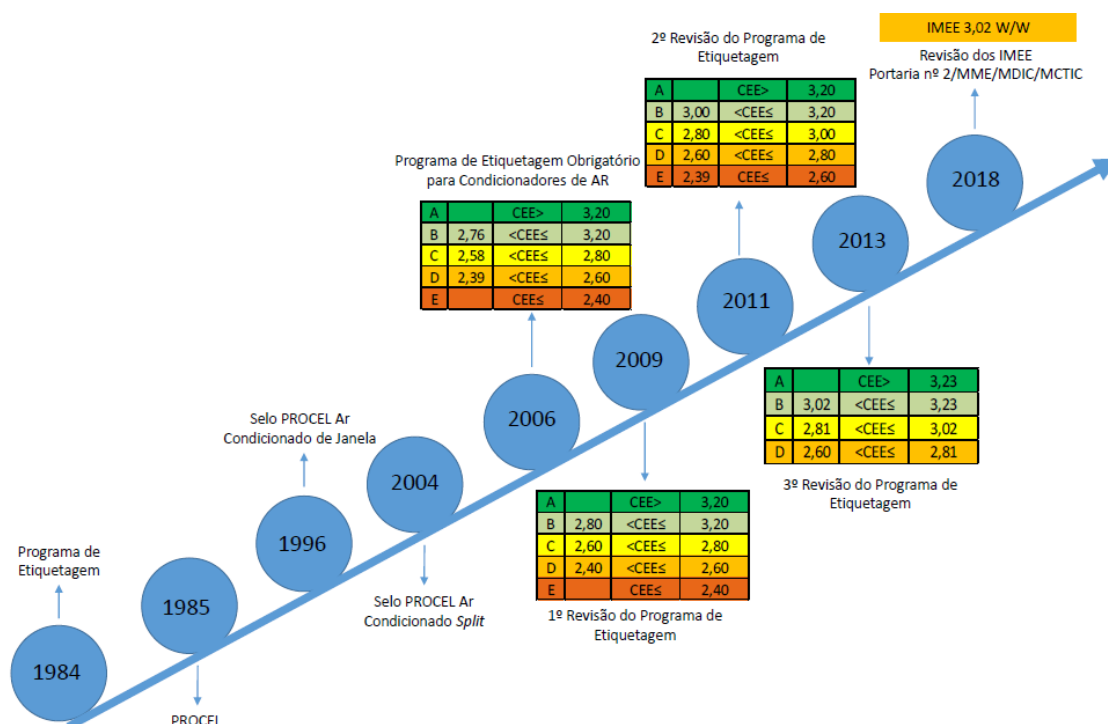


Figura 2.2. Evolução dos programas de etiquetagem em condicionadores de ar no Brasil. Fonte: Elaboração própria baseado em EPE (2018).

O grande desafio do PBE é atualizar periodicamente o Coeficiente de Desempenho (COP), também denominado de Coeficiente de Eficiência Energética (CEE), de maneira a oferecer estímulos na evolução da tecnologia dos equipamentos. Atualmente isso não tem ocorrido, uma vez que a maioria dos equipamentos já se encontra nas faixas superiores de desempenho (BAJAY *et al.*, 2018).

Em 2006, o PBE estabeleceu o programa de etiquetagem comparativa obrigatório para os condicionadores de ar, os quais foram revisados em 2009, 2011 e 2013. Para o caso dos IMEE, de acordo com a Portaria Interministerial N° 2, de 31 de Julho de 2018, os IMEE para os condicionadores de ar tipo *split* foram revisados de 2,60 W/W para 3,02 W/W. Este crescimento no patamar de desempenho eliminou a fabricação e a importação dos condicionadores de ar com classe de eficiência C e D do PBE até então vigente. A partir desta revisão, somente os equipamentos classificados como A e B estariam disponíveis no

mercado nacional (DOU, 2020). De acordo com o art. 9º da mesma portaria, novos IMEE deverão ser estabelecidos a cada quatro anos. O INMETRO é o órgão responsável pela fiscalização, acompanhamento e avaliação do cumprimento das metas propostas e o CGIEE é o responsável pelas deliberações competentes sobre as ações governamentais de suporte ao programa de metas (MME, 2018).

Por meios da portaria 234, de 29 de junho de 2020, os requisitos para a avaliação de conformidade nos condicionadores de ar foram otimizados, estabelecendo uma nova faixa de classificação das categorias de eficiência energética. As métricas utilizadas para estimar o CEE são as *Energy Efficiency Ratio (EER)* e a *Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER)*. A métrica *EER* representa a razão entre a capacidade de refrigeração pelo consumo de eletricidade, medido em plena carga. Cabe salientar que esta métrica não representa o desempenho energético de um equipamento em condições reais, uma vez que os condicionadores de ar operam com carga total por apenas um curto período de tempo. Esta lacuna é corrigida com a utilização da métrica *SEER*, a qual fornece uma medida mais representativa do desempenho de eficiência energética nos condicionadores de ar. A métrica *SEER* vem substituindo a *EER* no estabelecimento dos requisitos dos IMEE e etiquetagem (ECONOLER *et al.*, 2011) em vários países. No Brasil, a *SEER* é denominada de Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS).

O cômputo da eficiência energética para os condicionadores de ar estabelecidos pelo PBE desde sua implementação era realizado pelo método de carga total, não capturando os benefícios em eficiência energética dos condicionadores de ar com compressores de rotação variável. Este método também não permite que os consumidores estejam adequadamente informados sobre o desempenho energético dos produtos disponíveis no mercado. O PBE utiliza a ISO 5151 para os condicionadores de ar, exigindo poucas adequações na infraestrutura laboratorial para adotar a métrica IDRS. A internalização da métrica sazonal sugere a adoção da metodologia de ensaio presente na norma ISO 16358-1:2013, na qual as temperaturas de testes, pontos de ensaio e *bins* de temperaturas foram ajustados à realidade brasileira (DOU, 2020). O ANEXO A apresenta os *bins* de temperatura externa e as condições de ensaio para os condicionadores de ar com compressor de rotação variável no Brasil. A eficiência energética definida pelo IDRS representa a razão entre a quantidade anual total de calor pela quantidade total de energia consumida pelo equipamento no mesmo intervalo de tempo. A alteração (já em vigor) para a métrica sazonal captura de maneira mais

precisa a eficiência energética nos condicionadores de ar, principalmente nos equipamentos com compressores de rotação variável (*inverter*).

No Brasil, os novos IMEE para os condicionadores de ar entraram em vigência a partir de julho de 2019. A definição das futuras classes de eficiência energética e dos IMEE para os condicionadores de ar tipo *split* é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Projeção para as novas classes de eficiência e IMEE.

Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (W/W)	31 de Dezembro de 2022	31 de Dezembro de 2025
Classe A	$\geq 5,50$	$\geq 7,00$
Classe B	$\geq 5,00$	$\geq 6,50$
Classe C	$\geq 4,50$	$\geq 5,30$
Classe D	$\geq 4,00$	$\geq 4,60$
Classe E	$\geq 3,50$	$\geq 3,90$
Classe F (IMEE)	$\geq 3,14$	$\geq 3,50$

Fonte: DOU (2020).

A nova etiqueta do PBE apresentará duas classes adicionais de eficiência energética (E e F). As novas faixas serão computadas pela métrica IDRS e serão atualizadas em 2022 e 2025. No contexto dos IMEE, em 2022 o valor se manterá na faixa de 3,14 W/W ao passo que em 2025 o INMETRO recomenda um aumento para 3,50 W/W.

É importante destacar que o PBE, o selo Procel e os IMEE são programas diferentes, cujo enfoque principal é a eficiência energética no Brasil. O PBE, coordenado pelo INMETRO, apresenta informações de desempenho energético através de faixas de classificação de eficiência energética. O selo Procel é uma ferramenta que apresenta para os consumidores os equipamentos mais eficientes dentro de uma certa categoria. Os IMEE, coordenado pelo CGIEE, estabelecem requisitos mínimos de eficiência para que um produto seja comercializado.

2.2 Considerações Gerais sobre os Condicionadores de Ar

O conforto ambiental gerado por condicionadores de ar contribui cada vez mais com o aumento da demanda global de energia elétrica. O consumo energético nestes equipamentos tem sido objeto de estudo em diversas regiões do globo, principalmente nos países em desenvolvimento e de clima tropical (IEA, 2018). No Brasil, estima-se que a elevação no consumo de energia elétrica no setor residencial para os próximos anos, ocorrerá pela crescente demanda no uso destes equipamentos (EPE, 2016).

Os condicionadores de ar são largamente utilizados nos setores industrial, comercial e residencial. Quanto aos tipos de sistemas, classificam-se em duas categorias: expansão direta

e indireta. Na expansão direta, o ar a ser resfriado troca calor com as serpentinas do evaporador através do fluido refrigerante expandido. Na expansão indireta, um fluido refrigerante secundário (água) é utilizado na troca de calor com o fluido refrigerante expandido e depois com ar a ser condicionado através de ventiladores (DUARTE, 2010). A Figura 2.3 apresenta os condicionadores de ar tipo janela (a) e *split* (b). Estes equipamentos são largamente utilizados no setor residencial e são sistemas de expansão direta. O condicionador de ar tipo *chiller-fancoil* é exemplo de sistema de expansão indireta e apresenta maior utilização nos setores comercial e industrial.

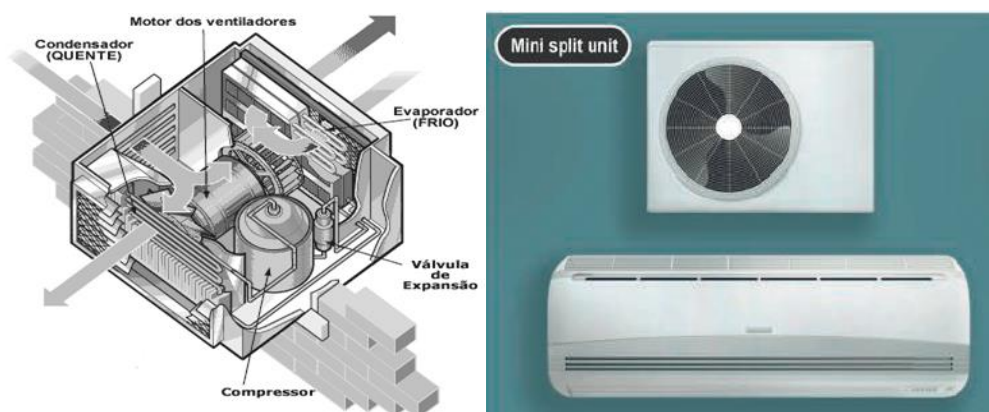


Figura 2.3. Condicionador de ar tipo janela (a) e *split* (b). Fontes: Cardoso (2012) e IEA, 2018.

Os componentes básicos dos condicionadores de ar tipo janela e *split* são o compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. No compressor, o fluido refrigerante é comprimido até atingir a pressão de condensação. No condensador, ocorre o processo de transferência de calor do fluido refrigerante para o ambiente externo. No dispositivo de expansão (tubo capilar, pistão, válvula de expansão termostática e válvula de expansão eletrônica), o fluido refrigerante é expandido desde a pressão de condensação à pressão de vaporização. No evaporador, o calor do ambiente interno é transferido para o fluido refrigerante (VENTURINI & PIRANI, 2005).

Os condicionadores de ar tipo janela são equipamentos instalados em aberturas na parede ou em esquadrias. Possuem baixa capacidade (7.000 a 30.000 *BTU/h*) e são compactos, isto é, a unidade condensadora e a unidade evaporadora encontram-se no mesmo gabinete. Os condicionadores de ar tipo *split* (separado) apresentam capacidades que variam de 7.000 a 80.000 *BTU/h* e são compostos por duas unidades, a unidade evaporadora (ambiente a ser climatizado) e a unidade condensadora (parte externa da edificação). As

unidades interna e externa são interligadas por tubulações de cobre ou alumínio (SANTOS, 2017).

Segundo Marangoni *et al.* (2015), o consumo energético dos condicionadores de ar depende do tempo de funcionamento do compressor. Quanto às tecnologias dos compressores, as de velocidade fixa (convencional) e variável (*inverter*) ganham destaque. Nos condicionadores de ar de velocidade fixa, o compressor encontra-se somente no *status* ligado ou desligado (*on-off*). Quando em funcionamento, estes compressores atuam com capacidade (velocidade) máxima. A tecnologia *inverter*, por sua vez, controla a rotação do compressor em função da carga térmica do ambiente interno, promovendo uma economia no consumo de energia elétrica em torno de 30%. A participação dos condicionadores de ar para o setor residencial brasileiro por tipo de equipamento e fluido refrigerante é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Mercado de condicionadores de ar (2019) e fluidos refrigerantes.

Tipo	Participação (%)	Fluidos Refrigerantes
<i>Split</i> (convencional)	58,33	R-22/R-410A
<i>Split</i> (<i>inverter</i>)	8,09	R-410A
Janela	30,8	R-22
Portátil	2,96	R-22/R-410A
Outros	0,54	R-22/R-410A

Fonte: ELETROBRÁS (2019).

O uso dos condicionadores de ar no setor residencial brasileiro é formado em sua quase totalidade (97%) por equipamentos individuais tipo *split* e janela. Nestes equipamentos, os principais fluidos refrigerantes utilizados são o Hidroclorofluorcarboneto (HCFC) R-22 e o Hidrofluorcarboneto (HFC) R-410A. Todos os condicionadores de ar tipo *split inverter* utilizam o R-410A como fluido refrigerante, ao passo que os condicionadores de ar convencional e de janela usam o R-22. Entretanto, alguns fabricantes utilizam o R-410A em equipamentos convencionais (ELETROBRÁS, 2019).

Os condicionadores de ar são grandes consumidores de energia elétrica. A Figura 2.4 apresenta a variação do consumo de energia elétrica em 2020 para os principais setores no Brasil. No agregado, o consumo de energia em 2019 atingiu 481.819 GWh. Em 2020 houve uma redução de 1,6% do consumo total de eletricidade em relação a 2019 (474.231 GWh). Apesar da redução, o setor residencial foi o único que apresentou um crescimento (4,1%) no consumo de energia elétrica. O setor comercial foi o mais atingido, com uma diminuição de 10,5% (EPE, 2021). É importante destacar que o aumento do consumo no setor residencial e a redução nos demais setores têm uma correlação direta com os efeitos da pandemia da Covid-19,

uma vez que o comércio e as indústrias estavam sujeitos a restrições em 2020. Ainda de acordo com a EPE (2021), o setor residencial foi responsável por 31,25% do consumo total de eletricidade no país (142.411 GWh).

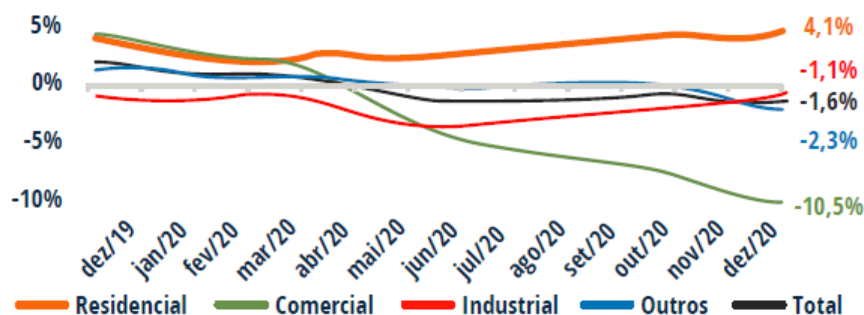


Figura 2.4. Segmentação do consumo de eletricidade. Fonte: EPE (2021).

Os condicionadores de ar apresentam um consumo energético expressivo no setor residencial. Segundo a pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso (PPH) realizada pela ELETROBRÁS (2007), o consumo devido ao uso destes equipamentos representou cerca de 20% da energia utilizada nas residências brasileiras em 2005. No entanto, dados mais recentes da EPE demonstram que o consumo de energia elétrica pelo uso dos condicionadores de ar no setor residencial, além de ter triplicado nos últimos 12 anos atingiu 18.700 GWh em 2017, equivalente a 13,7% do consumo de eletricidade no setor naquele ano (EPE, 2018).

Ainda de acordo com a PPH de 2005, a posse (difusão) dos condicionadores de ar foi de 0,16 aparelhos por residência. No entanto, a difusão encontrada na última (PPH) realizada pela ELETROBRÁS apresenta um aumento em relação à primeira. Para o ano base de 2018, a última PPH estabelece que a difusão dos condicionadores de ar é de 0,22 por residência (ELETROBRÁS, 2019). Levando em consideração as duas PPHs pode-se notar um crescimento no uso dos condicionadores de ar no setor residencial brasileiro. Em 2005, ano base da primeira PPH, os condicionadores de ar tipo *split* estavam penetrando no mercado brasileiro. Nos anos que se seguiram, um elevado crescimento no uso destes equipamentos foi observado, que justifica o aumento na difusão dos condicionadores de ar no setor residencial entre as duas pesquisas.

Apesar do elevado crescimento nas vendas dos condicionadores de ar observado nas últimas décadas, a difusão destes equipamentos nas residências brasileiras ainda é relativamente baixa quando comparada com outros países, como por exemplo a China e os Estados Unidos. De acordo com a EPE (2018) nestes países, a difusão dos condicionadores

de ar por residência é de 1 ou 2 aparelhos, respectivamente, ao passo que no Brasil a difusão dos condicionadores de ar encontra-se em torno de 0,4 por residência (EPE, 2018).

É importante destacar as divergências entre a última PPH (ELETROBRÁS, 2019) e os dados obtidos pela EPE (EPE, 2018). Ao passo que a PPH apresenta a difusão de 0,22 por residência, este valor diverge dos resultados da EPE, cujo valor é de 0,4. Pode-se atribuir esta discordância às questões metodológicas e com isso demonstrar que, pelo fato do Brasil ser um país de grande dimensão, não é uma tarefa fácil estimar estes parâmetros em nível nacional.

Ainda de acordo com a EPE (2018), o uso dos condicionadores de ar apresenta uma forte tendência de crescimento. Este aumento deve ocorrer principalmente pelo aumento da população, da elevação na renda das famílias e da crescente preferência dos indivíduos por ambientes climatizados. A crescente demanda por condicionadores de ar promoverá um elevado impacto sobre o sistema elétrico brasileiro. A pequena difusão, em conjunto com o potencial de crescimento da renda das famílias no longo prazo e as condições climáticas do país, indicam a existência de uma demanda reprimida por condicionadores de ar que deverá ser atendida ainda no futuro próximo. O aumento na difusão destes equipamentos, implica na necessidade de energia para atender esta demanda, principalmente nos horários de pico.

O uso dos condicionadores de ar também está relacionado com o aumento da poluição ambiental (emissão dos GEE). A demanda adicional de energia devido ao uso destes equipamentos resulta no aumento significativo das emissões de dióxido de carbono (CO₂), principalmente se essa demanda for atendida por usinas termelétricas (EPE, 2018).

Neste contexto, o aumento da eficiência energética nos condicionadores de ar é de grande relevância para reduzir o consumo de energia elétrica e os impactos ambientais devido ao uso destes equipamentos. As políticas públicas como os IMEE, bem como os programas de etiquetagem e outros mecanismos adicionais permitem a redução dos impactos energéticos e garantem que o aumento no uso dos condicionadores não acarrete em desnecessários custos econômicos, sociais e ambientais (IEA, 2014).

2.3 Estudos sobre IMEE

A definição ou a atualização dos IMEE é uma tarefa complexa devido à diversidade de agentes públicos e privados envolvidos e à necessidade de um esforço contínuo em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias (MELO, 2009). Wiel & McMahon (2005)

pontuam que este processo pode ser desenvolvido em oito passos, conforme mostra a Figura 2.5.

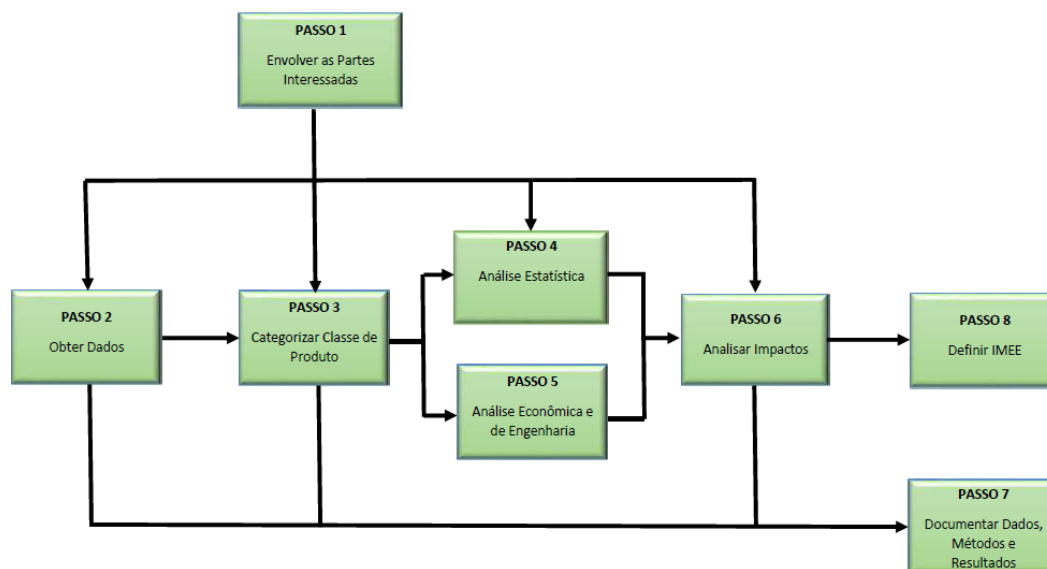


Figura 2.5. Etapas para a definição ou atualização dos IMEE. Fonte: Adaptado de Wiel & McMahon (2005).

A experiência de alguns países mostra que o envolvimento das partes interessadas (passo 1) é um fator determinante para o sucesso na implementação dos IMEE. As principais partes interessadas são os fabricantes, consumidores, órgãos governamentais, ambientais e grupos de eficiência energética. As informações necessárias para o estabelecimento dos novos padrões (passo 2) variam em função do método utilizado e dos recursos disponíveis para a obtenção dos dados. A categorização da classe de produtos (passo 3) é estabelecida com o propósito de diferenciar o consumo de energia resultante de recursos adicionais ou aplicação em diferentes modelos. A análise estatística (passo 4) e a análise econômica de engenharia (passo 5) são abordagens que podem ser utilizadas em função da quantidade e da qualidade dos dados disponíveis. A análise dos impactos (passo 6) para os consumidores, fabricantes e em nível nacional é uma fase crítica no estabelecimento de IMEE mais restritivos e o presente trabalho tem foco nesta etapa. Dentre as vantagens associadas à documentação (passo 7) destacam-se a correta identificação e o uso de cada componente da análise, possibilitando a reconstrução da análise em qualquer momento posterior. Após o término de todas as análises, documentados e considerados os comentários realizados pelas partes interessadas, os órgãos governamentais são responsáveis por avaliar os vários encargos e benefícios para cada alternativa e decidir, de forma justificada, as razões para sua decisão (passo 8). Conforme mencionado anteriormente, o passo 6 consiste na avaliação dos

impactos para os consumidores, fabricantes e em nível nacional pela implementação de IMEE mais restritivos.

Geller *et al.* (2004) pontuam que de 1975 a 2001, houve no Brasil um aumento de aproximadamente 250% no consumo de energia elétrica. Este crescimento é justificado pelo desenvolvimento industrial, urbanização e também pelo aumento do consumo energético nos setores comercial e residencial. O crescimento no consumo de energia no Brasil potencializou ações de eficiência energética como a criação de leis, programas específicos de conservação de energia, mecanismos para a introdução de melhores tecnologias e uso eficiente de energia. No entanto, a implementação e a gestão destes mecanismos têm se mostrado medíocres, com resultados modestos, dado o potencial das oportunidades perdidas (JANNUZZI, 2004).

Conforme já discutido, as métricas para avaliar a eficiência energética nos condicionadores de ar são baseadas em normas internacionais. Existem variações nos procedimentos de medição da eficiência energética e estas dificultam a comparação dos IMEE para diferentes países (GHISI & PESSOA, 2015). Entretanto, Econoler *et al.* (2011) desenvolveram correlações matemáticas que permitem minimizar os efeitos causados pelos diferentes procedimentos de teste e comparar os IMEE em condicionadores de ar tipo *split* em vários países. Os autores concluíram que é possível realizar comparações de eficiência energética entre diferentes países. Concluíram também que os índices mais restritivos foram encontrados no Japão. Os autores verificaram que apesar das limitações na precisão dos métodos de conversão, há ainda diferenças substanciais na eficiência dos condicionadores de ar e nas políticas energéticas aplicadas em diferentes mercados internacionais. O Brasil, embora seja um grande usuário de condicionadores de ar, não foi inserido nas correlações propostas pelos autores, sendo necessário o desenvolvimento de um fator de conversão que permite a comparação mais precisa entre os IMEE praticados no Brasil com outros países (GHISI *et al.*, 2015).

A Figura 2.6 apresenta os IMEE e a quantidade de condicionadores de ar vendidos no setor residencial para alguns países. Cabe salientar que a China representa 40% do mercado mundial dos condicionadores de ar, ao passo que a Índia, Brasil e Indonésia representam 10% e com uma expectativa de crescimento de 10% ao ano. A China, Brasil, Tailândia e México adotaram IMEE no início de 2010. Grande parte dos países em desenvolvimento possuem IMEE desatualizados, mostrando que há grandes oportunidades para melhorar a eficiência energética nestes equipamentos (SHAH *et al.*, 2017).

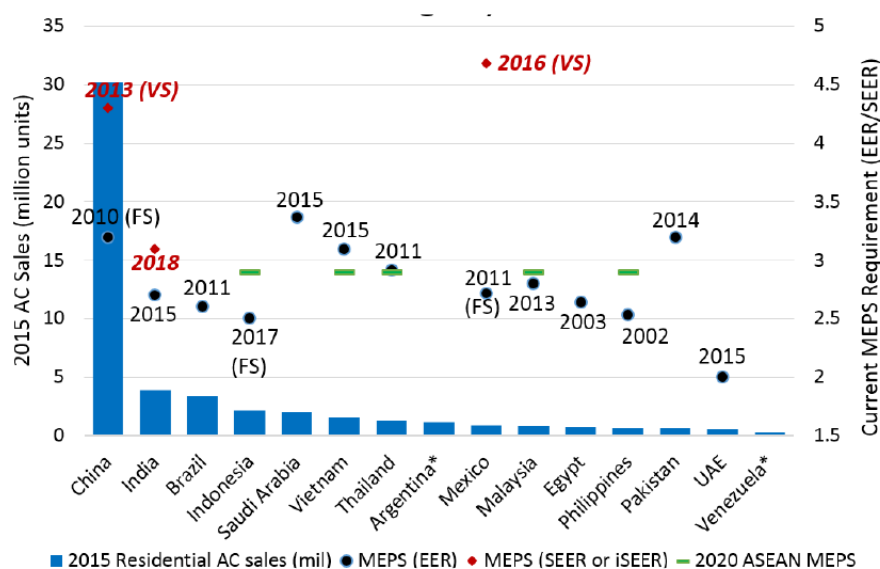


Figura 2.6. Exigência dos IMEE(MEPS) e participação de mercado global.
Fonte: Shah *et al.* (2017).

Letschert *et al.* (2012) avaliaram os impactos na introdução de IMEE mais restritivos que poderiam ser implementados em diversos usos finais para as 13 maiores economias mundial. Os autores utilizaram a metodologia *Bottom-Up Energy Analysis System (BUENAS)*, que consiste em uma ferramenta de modelagem de demanda de energia. A metodologia *BUENAS* cria cenários de eficiência energética avaliados a partir de um cenário de referência (*business as usual - BAU*). Os autores apresentaram os impactos dos IMEE mais restritivos em termos de economia de energia nacional, *VPL* e redução nas emissões de dióxido de carbono (CO_2). Os impactos dos IMEE implementados no ano de 2015 foram simulados para cada uso final e avaliados para os anos de 2020 e 2030. No agregado (para os 13 países e equipamentos analisados), os autores concluíram que o potencial de economia devido aos IMEE mais restritivos foram: 770 TWh no consumo de energia em 2020 e 1.500 TWh em 2030; 430 PJ (petajoule) de economia em combustíveis fósseis em 2020 e 1.100 PJ em 2030; redução de 17% no consumo de energia para os usos finais no setor residencial (condicionadores de ar, máquinas de lavar, refrigeradores, freezers, luminárias entre outros); 4% para os usos finais no setor industrial (transformadores de motores elétricos); 540 Mt de redução nas emissões anuais de CO_2 em 2020 e 1.000 Mt em 2030; 11 Gt de redução nas emissões acumuladas entre os anos de 2015 a 2030 e benefícios financeiros acumulados para os consumidores em torno de US\$ 1.500 bilhões.

Para os condicionadores de ar, os autores estimaram um potencial de economia anual de 120 TWh em 2020 e 310 TWh em 2030, que representa uma redução de 11% e 21% em relação ao *BAU*, respectivamente. A redução das emissões anuais de CO_2 foram de 71 Mt e

180 Mt para os anos de 2020 e 2030, respectivamente. A redução nas emissões CO₂ para os anos de 2015 até 2030 foram de 2100 Mt e o VPL atingiu o valor de US\$ 250 bilhões.

Na Índia, o aumento da eficiência energética em condicionadores de ar nos anos de 2006 a 2016 foi aproximadamente de 35% (3,5% ao ano). Abhyankar *et al.* (2017) avaliaram para estes equipamentos a viabilidade técnica, impactos e custos/benefícios no incremento da eficiência energética de 6% ao ano. Os impactos foram avaliados em relação a um cenário de referência (crescimento na eficiência energética de 3,5% ao ano). Para o cenário de referência, os IMEE para o ano de 2030 atingiriam o valor de 4,2 W/W (*ISEER*). Para o cenário de rápida aceleração na eficiência energética (crescimento de 6%), o nível de eficiência de 4,5 W/W (*ISEER*) seriam atingidos em 2016. A Figura 2.7 apresenta a projeção do crescimento na eficiência energética para os cenários analisados.

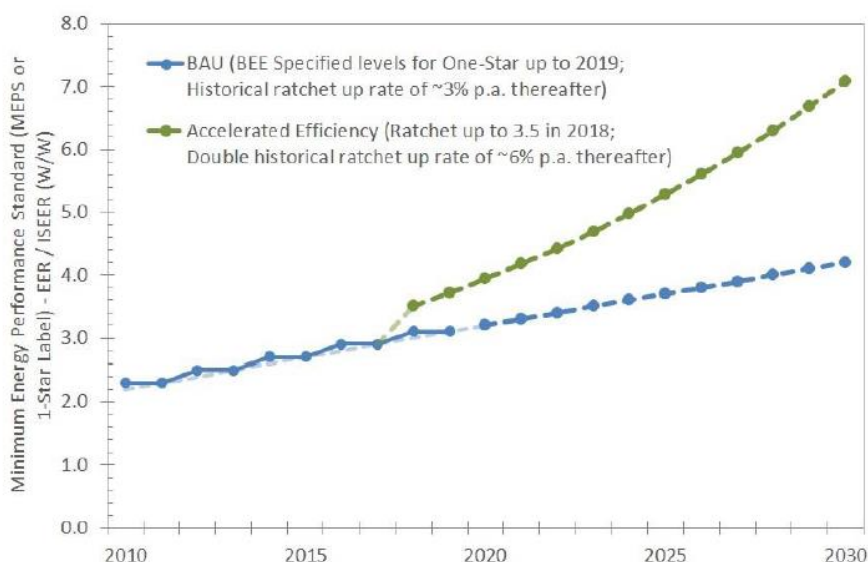


Figura 2.7. Projeção dos IMEE em condicionadores de ar na Índia (cenário de referência x cenário acelerado). Fonte: Abhyankar *et al.* (2017).

A análise demonstrou que a aceleração no incremento da eficiência energética de 3,5% ao ano para 6%, reduziria, para o ano de 2030, cerca de 30-40 GW de pico de carga (equivalente a 60-100 usinas de energia de 500 MW cada) e 64 TWh/ano em eletricidade. Os autores também verificaram que o incremento acelerado da eficiência energética, fortaleceria a capacidade dos fabricantes de atuarem no mercado global.

No Brasil, Melo (2009) propôs uma metodologia para estimar os impactos no estabelecimento de IMEE mais restritivos em condicionadores de ar, refrigeradores, televisores e lâmpadas. O autor avaliou a relação custo-benefício e eficiência energética sob a perspectiva dos consumidores e da sociedade. O autor também avaliou a possibilidade no

aumento das restrições dos padrões em vigor e a oportunidade da abrangência dos padrões para outros usos finais.

Sob a perspectiva dos consumidores, os resultados mostraram que os condicionadores de ar com capacidade entre 6.000 a 8.000 *BTU/h* apresentaram duas opções de IMEE com benefícios maiores ou iguais aos custos, o que representou um potencial de eficiência energética de aproximadamente 11% em relação aos equipamentos com classificação A do PBE. Os demais cenários não apresentaram resultados viáveis economicamente. Sob a perspectiva da sociedade, os benefícios agregados com as economias de energia atingiram a ordem de R\$ 535 milhões em termos de *VPL*. O autor identificou algumas questões limitantes que dificultaram a realização do trabalho: a ausência de dados sobre a real participação de mercado; a necessidade de séries de dados históricos da posse dos equipamentos; a ausência de dados experimentais e laboratoriais para as opções de engenharia sugeridas; a adequação das opções de engenharia no contexto dos modelos nacionais e; a verificação dos custos incorridos junto aos fabricantes nacionais para cada opção de eficiência energética.

Cardoso (2012) avaliou os impactos energéticos atribuídos ao PBE e ao programa selo PROCEL em refrigeradores de uma porta, condicionadores de ar e motores elétricos em termos de economia de energia, redução da demanda de pico e redução das emissões de GEE. Os impactos foram avaliados considerando os efeitos das perdas de desempenho ao longo da vida útil do equipamento, bem como os efeitos sazonais típicos das regiões brasileiras e por desagregação setoriais. O autor verificou que em 2009, o PBE e o selo PROCEL beneficiaram o Brasil com uma economia de energia de 7.189 GW (equivalente a abastecer 3 milhões de residências) e uma redução de demanda de pico de 3,7 GW (equivalente a 4% da potência instalada no Brasil no corrente ano).

As maiores economias foram obtidas nos refrigeradores de uma porta (49%), seguido dos condicionadores de ar (29%) e motores elétricos (22%). Adotando o fator de emissão de GEE do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) fornecido pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), a economia de energia alcançada pelos equipamentos avaliados, demonstrou que os programas de etiquetagem no Brasil evitaram a emissão de aproximadamente 350 Mt de CO₂ na atmosfera (equivalente a 718.000 barris de petróleo cru queimados).

Pereira *et al.* (2013) desenvolveram uma análise crítica sobre a segurança energética e a minimização dos impactos devido à crescente demanda de condicionadores de ar. Os autores verificaram que no Brasil, mecanismos legais de conservação de energia existem

desde 2001, entretanto, somente a partir de 2007, com a aprovação da regulamentação específica para os condicionadores de ar, os IMEE foram estabelecidos nestes equipamentos. Os autores comentam que a elevação do desempenho energético nos condicionadores de ar é uma necessidade evidente, levando em consideração o atual panorama energético nacional.

Os IMEE estabelecidos nas regulamentações brasileiras, ainda se mostravam tímidos quando comparados aos praticados por outros países. Uma análise com foco nos condicionadores de ar tipo *split* demonstrou que economias como as da União Europeia, China e Japão comercializam equipamentos com eficiência energética muito superior aos melhores equipamentos brasileiros. Os autores destacaram que o Brasil não pode aceitar condicionadores de ar de baixo desempenho energético, sendo essencial e urgente a determinação de IMEE mais restritivos, impulsionando o mercado a privilegiar os equipamentos mais eficientes. Por fim, os autores concluíram que é importante a adoção de métricas que forneçam uma medida mais representativa do desempenho do equipamento (*SEER*), com base no perfil do clima local (PEREIRA *et al.*, 2013).

Ghisi *et al.* (2015) apresentaram o *Estado da Arte* de eficiência energética em condicionadores de ar. O trabalho foi desenvolvido através de estudos em parceria com o *Collaborative Labeling & Appliance Standards Program (CLASP)*, que realizaram um levantamento das eficiências energéticas em condicionadores de ar em diferentes economias mundiais e discutiram melhorias técnicas disponíveis e a relação custo-benefício na comercialização de condicionadores de ar mais eficientes. Os autores concluíram que o Brasil se beneficiaria com IMEE mais restritivos, uma vez que o conhecimento da indústria sobre as tecnologias permite este avanço e que o custo de implementação de condicionadores de ar mais eficientes seria vantajoso, tanto para o Estado quanto para os consumidores.

A justificativa para que uma atenção especial seja dada à eficiência energética em condicionadores de ar ocorre em função do expressivo consumo elétrico destes equipamentos. Os autores concluíram também que o conhecimento da indústria das atuais tecnologias usadas em condicionadores de ar permite o aumento na eficiência energética e que o desafio na comercialização de equipamentos mais eficientes não é tecnológico, mas sim de tornar esses produtos mais competitivos no mercado brasileiro, da fabricação até a aquisição pelos consumidores.

Costa (2017) avaliou o PBE e os IMEE utilizando uma abordagem denominada Avaliação Baseada em Teoria (ABT). Esta metodologia baseia-se na elaboração de um modelo (teoria) que explica como um programa de políticas públicas promove os resultados

pretendidos. A teoria enfatiza tanto o mecanismo principal pelo qual o programa opera, via influência sobre a decisão de compra dos consumidores, como o conjunto de fatores (comportamentais, econômicos, demográficos e climáticos), que moderam a relação entre o programa e os seus efeitos.

Os resultados demonstraram que dos aparelhos analisados (refrigeradores e condicionadores de ar), os programas de eficiência energética apresentaram o comportamento esperado, isto é, tendência de elevação ao longo do tempo. O autor identificou que os níveis de reconhecimento e influência do PBE entre os consumidores são elevados e que as revisões nos IMEE apresentaram falhas de implementação, a despeito do aumento na eficiência energética observado nos refrigeradores e condicionadores de ar.

Costa *et al.* (2019) desenvolveram um guia que estabelece os procedimentos a serem adotados na implementação de IMEE mais restritivos com foco em condicionadores de ar tipo *split* no Brasil. O Estudo de Impacto Regulatório (EIR) realizado foi desenvolvido nas etapas de: (1) identificação do problema, (2) coleta de dados, (3) análise econômica e de engenharia, (4) análise de impactos, (5) documentação de dados e (6) justificativa para os novos padrões de eficiência energética. A análise de impactos dos IMEE mais restritivos foi realizada para cinco diferentes cenários, considerando o setor residencial e comercial, agregados. A Tabela 2.4 apresenta os principais resultados encontrados na pesquisa.

Tabela 2.4. Impactos para os consumidores, fabricantes e em nível nacional.

<i>EER</i> (W/W)	Consumidores		Fabricantes		Nacionais		
	<i>CCV</i> (R\$)	<i>Payback</i> (Anos)	Investimentos (milhões R\$)	<i>VPL</i> (milhões R\$)	Redução Emissões de CO ₂ (Mt)	Redução Energia Primária (<i>tep</i>)	Redução Pico de Carga (MWh)
3,23	3.388,00	0,7	24,1	-18,3	1,25	0,42	91,5
3,44	3.342,00	2,1	82,8	-26,6	4,87	1,64	356,29
3,50	2.910,00	2,1	117,6	245,3	35,03	11,80	2.560
3,98	2.692,00	2,1	132,4	400,3	50,71	17,08	3.706
4,80	2.773,00	3,5	132,4	921,8	62,30	20,98	4.553

Fonte: Adaptado de Costa *et al.* (2019).

As simulações demonstraram que para os consumidores os maiores benefícios foram obtidos para o IMEE *EER*=4,80, com um *payback* de 3,5 anos. Para os fabricantes e em nível nacional, os maiores benefícios foram obtidos para o cenário de máxima eficiência (IMEE *EER*=4,80). Os autores pontuam sobre a necessidade de estudos que busquem o incremento

da eficiência energética em condicionadores de ar em períodos regulares de tempo e sugerem a alteração da atual métrica de eficiência energética *EER* para a *IDRS*. Os autores também concluem que a participação das partes interessadas (associações industriais, órgãos governamentais, institutos de testes, universidades, grupos ambientalistas, ONGs entre outros) é um fator que garante o bom desenvolvimento do processo de implementação de *IMEE* mais restritivos.

Manso & Bastos (2020) realizaram duas contribuições importantes para a literatura sobre eficiência energética para os condicionadores de ar fabricados no Brasil. A primeira consiste na enumeração das principais aplicações socioeconômicas na conversão para produtos mais eficientes. A segunda é a estimativa de economia de energia e seus efeitos sobre o sistema elétrico nacional, consumidores e meio ambiente. A simulação foi realizada a partir de uma amostra de 40 condicionadores de ar tipo *split*, com níveis de eficiência energética já testados com base na nova métrica sazonal.

Os autores estimaram uma economia de energia de 87,9 bilhões de kWh e uma redução nas emissões de CO₂ na ordem de 6,7 milhões de toneladas. A economia de energia aproxima-se dos R\$ 70 bilhões. Os autores concluem que a elevação dos *IMEE* com sua correspondente alteração para a métrica sazonal e as mudanças nas classes de etiquetagem tornam os condicionadores de ar fabricados no Brasil compatíveis com as melhores práticas internacionais. Esta economia também potencializa benefícios como a redução nos custos de produção, geração de energia, melhorias no bem-estar social e avanços tecnológicos.

2.4 Estudos sobre Fluidos Refrigerantes

A Emenda de Kigali é uma contribuição ao Protocolo de Montreal (ANEXO B) que inclui os HFCs como substâncias a serem eliminadas do mercado. Os HFCs são largamente utilizados em sistemas de refrigeração e condicionadores de ar como fluidos refrigerantes. A Emenda de Kigali estabelece um cronograma para a redução no consumo e produção dessas substâncias, impulsionando grandes esforços para conter o aumento da temperatura global mantendo-a abaixo de 2°C, conforme determinado pelo Acordo de Paris. Os cronogramas para os países em desenvolvimento são mais flexíveis em relação aos estabelecidos para os países desenvolvidos. O Brasil, por exemplo, terá até o ano de 2045 para reduzir em 80% o consumo dos HFCs, tomando como referência a média de uso para os anos de 2020 e 2022 (ECOIA, 2016).

Peixoto (2007) pontua que os sistemas de refrigeração, bomba de calor e condicionadores de ar representam o maior consumo de substâncias químicas halogênicas. Nos condicionadores de ar tipo *split*, destaca-se o uso do HFC R-410A. Os HFCs utilizados em sistemas de refrigeração e condicionadores de ar possuem elevados *GWP* (1924). A Tabela 2.5 apresenta as características do R-410A (alto *GWP*) e de alguns fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP* (utilizados neste trabalho), testados pelo *Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI)* que podem substituir o atual R-410A. Neste contexto, adicionalmente à elevação dos IMEE, a Emenda de Kigali apresenta uma relevante oportunidade para reduzir as emissões dos GEE pela substituição do fluido refrigerante R-410A, em condicionadores de ar tipo *split*.

Tabela 2.5. Fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP* testados por *AHRI*.

Fluido Refrigerante	Fabricante	Classe de Segurança (ASHRAE)	<i>GWP</i>
R-410A	-	A1	1924
ARM-71A	Arkema	A2L	461
R-32	Daikin	A2L	677
DR-55	Chemours	A2L	676
L-41	Honeywell	A2L	572
HPR-2A	Mexichem	A2L	593

Fonte: Adaptado de Abdelaziz & Shrestha (2014).

O fluido refrigerante R-410A apresenta classificação A1 (toxidade não identificada e não propaga chamas nas condições atmosféricas de 18 °C e pressão de 101,325 kPa). Os principais fluidos refrigerantes com potencial para substituir o R-410A possuem *GWP* entre 461 e 677 e classificação de flamabilidade A2L (flamabilidade muito baixa). Os fluidos refrigerantes considerados nesta tese apresentam propriedades semelhantes ao R-410A, incluindo o uso do mesmo óleo lubrificante (polioéster).

Os impactos devido ao uso dos condicionadores de ar podem ser classificados em duas categorias, diretos e indiretos. Os impactos diretos correspondem às emissões ocorridas por vazamentos (acidentais) dos fluidos refrigerantes para a atmosfera que ocorrem ao longo da vida útil do equipamento. Os fluidos refrigerantes apresentam propriedades termodinâmicas diferentes, que influenciam na eficiência energética do equipamento, portanto, os impactos indiretos representam as emissões produzidas devido ao consumo de energia elétrica na operação do equipamento.

Os HFCs quando lançados na atmosfera poluem o meio ambiente. Estas substâncias são largamente utilizadas em sistemas de refrigeração e condicionadores de ar. Xu *et al.*

(2013) avaliaram os benefícios na redução das emissões dos HFCs no contexto das emissões de GEE, conforme mostra a Figura 2.8.

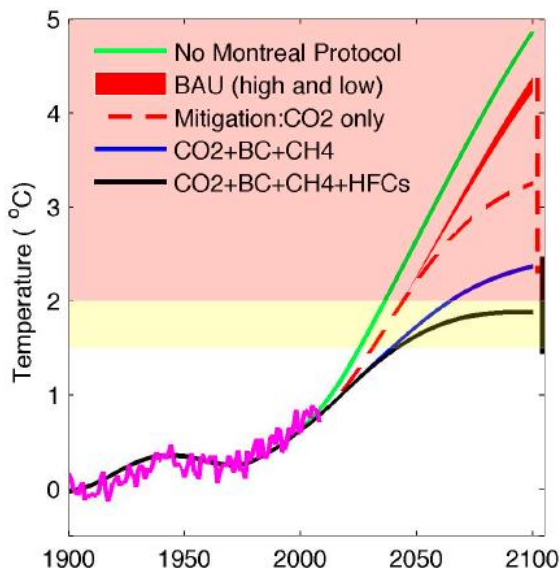


Figura 2.8. Cenários para mitigação dos GEE. Fonte: Xu *et al.* (2013).

De acordo com os autores, a redução nas emissões de CO₂, Carbono Negro (*black carbon*), e metano (CH₄) não são suficientes para limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2 °C, conforme estabelecido pelo Acordo de Paris. Os resultados demonstraram que a mitigação do potencial de crescimento dos HFCs tem um papel relevante no cumprimento da meta estabelecida. Os autores concluíram que a mitigação dos HFCs não deve ser vista como uma estratégia alternativa para evitar o aquecimento em 2 °C, e sim como um mecanismo essencial de uma estratégia que também requer a mitigação de CO₂ e outros poluentes.

Um dos fatores que também desempenhou um papel fundamental na busca por eficiência energética foi a emergente preocupação com o meio ambiente e com as mudanças climáticas. A eficiência energética aparece nesse contexto como uma das alternativas para redução de GEE (NASCIMENTO, 2015).

Venturini & Pirani (2005) pontuam que dentre as principais características desejáveis de um fluido refrigerante (ser não tóxico, não inflamável, de fácil detecção para vazamentos e de baixo custo), é importante que este não seja poluente. O uso de fluidos refrigerantes em condicionadores de ar contribui para as emissões dos GEE. Os impactos ocorrem tanto na liberação do fluido refrigerante para a atmosfera, como nas emissões de CO₂ pelo uso de

combustíveis fósseis para geração de energia necessária para a operação do equipamento (AIRAH, 2012).

Baseado na crescente contribuição dos sistemas de refrigeração para as mudanças climáticas, Makhnatch & Khodabandeh (2014) desenvolveram um estudo comparativo entre os principais índices que facilitam a tomada de decisões no processo de seleção do fluido refrigerante. Os índices *GWP* (*Global Warming Potential*), *TEWI* (*Total Equivalent Warming Impact*) e *LCCP* (*Life-Cycle Climate Performance*) foram avaliados em um sistema de bomba de calor com capacidade de 30 kW.

O *GWP* representa o potencial de aquecimento global pelas emissões dos GEE. Este valor é avaliado em relação ao CO₂ (*GWP*=1). Os impactos são estimados levando em consideração o horizonte de tempo de 100 anos. O índice *TEWI*, além de contabilizar os impactos diretos (*GWP*), leva em consideração o efeito indireto das emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis referente à geração de energia para operar os equipamentos ao longo de sua vida útil. O *LCCP* contabiliza os impactos diretos, indiretos e as emissões relacionadas à manufatura e transporte do equipamento e do fluido refrigerante. Os autores verificaram que o índice *TEWI* é menos complexo que o *LCCP* e mais correto que o *GWP* na seleção de um fluido refrigerante ecologicamente correto. Os autores observaram que o índice *TEWI* é sensível em relação ao desempenho energético do sistema. Assim, a eficiência energética é um parâmetro importante que deve ser considerado na seleção de um fluido refrigerante. Dos fluidos verificados no sistema de bomba de calor, os autores demonstraram que o R-152a, R-290 e R-1270, podem ser considerados bons fluidos refrigerantes substitutos para o R-410A.

Pereira (2010) avaliou o impacto da utilização dos sistemas de refrigeração doméstica (refrigeradores) no contexto do aquecimento global. A metodologia proposta pelo autor consistiu em uma revisão dos trabalhos apresentados por outros autores, levando em consideração a influência específica dos componentes dos sistemas de refrigeração (fluido refrigerante e compressores), sobre o índice *TEWI* e a influência da degradação temporal dos componentes em relação à perda de eficiência no sistema. Um modelo matemático foi desenvolvido, testado e posteriormente confrontado com os valores calculados pelo índice *TEWI* tradicional.

Os resultados demonstraram que é vantajosa a substituição dos equipamentos antigos por novos, que trabalhem com tecnologias que privilegiem a eficiência energética e a utilização de fluidos refrigerantes menos agressivos ao meio ambiente, como os fluidos

refrigerantes naturais. O autor observou também uma redução de 3.630 toneladas de CFC-12 (R-12) e uma economia anual de 4.356 GWh. Em termos de redução nas emissões de CO₂, o autor estimou uma redução anual cerca de 7,25 Gt.

Antunes *et al.* (2014) avaliaram os impactos ambientais para três diferentes fluidos refrigerantes usados como substitutos para o R-22, em sistemas de refrigeração comercial de capacidade de 15 kW. No estudo, não foram realizadas alterações nos componentes básicos e operação do ciclo, com exceção do óleo lubrificante. Os autores desenvolveram uma análise termodinâmica do ciclo, variando a velocidade do compressor e a abertura na válvula de expansão eletrônica (VEE). Os fluidos refrigerantes R-290, R-32 e R-410A foram avaliados como substitutos para o R-22, largamente utilizado em condicionadores de ar.

Os resultados demonstraram que o sistema com R-290 apresentou um desempenho superior para toda faixa de operação explorada. Os autores comprovaram através da métrica *TEWI* que quando o sistema apresenta um aumento no desempenho, promove uma redução nos efeitos diretos e indiretos no aquecimento global e que o uso de fluidos refrigerantes de baixo *GWP* reduz os impactos para o meio ambiente.

Shah *et al.* (2015) forneceram para alguns países uma estimativa do potencial de redução de pico de carga e redução das emissões de GEE em condicionadores de ar, adotando políticas de melhoria de eficiência energética e transição de fluidos refrigerantes de baixo *GWP*. O estudo foi implementado em duas etapas: (1) análise individual do incremento da eficiência energética e da troca do fluido refrigerante de baixo *GWP*; (2) análise simultânea do incremento da eficiência energética e da troca do fluido de baixo *GWP*.

Os autores demonstraram que os benefícios na implementação da eficiência energética em paralelo com a transição dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP* são ampliados. Para um cenário de referência (equipamentos ineficientes e com fluido refrigerante de alto *GWP*), os autores verificaram que o uso de equipamentos mais eficientes e fluidos refrigerantes de baixo *GWP* economizaria para o ano de 2030 entre 340-790 GW de carga de pico. Esta economia corresponde à capacidade de 680-1550 usinas, com potência de 500 MW cada.

Embora haja incertezas relacionadas às projeções das emissões e no crescimento da demanda de condicionadores de ar, o aumento de 30% na eficiência energética em relação a atual tecnologia, poderá evitar até 25 bilhões de tCO₂ em 2030 e 40 bilhões em 2050. Portanto, os autores concluem que condicionadores de ar mais eficientes e com fluidos

refrigerantes de baixo *GWP*, devem ser considerados para minimizar a carga de pico e maximizar a redução das emissões de GEE em nível global.

Devido à grande contribuição dos condicionadores de ar nas emissões de GEE, Babiloni *et al.* (2017) reuniram pesquisas relevantes para avaliar a viabilidade do R-32 em sistemas de refrigeração na Europa e nos EUA. Os autores concluíram que o R-32 tem características de transferência de calor significativamente boas e que seu desempenho é muito semelhante ao do R-32 em toda a faixa operacional e, portanto, concluíram que o R-32 será utilizado nos países que priorizam os fluidos refrigerantes de baixo *GWP*. Os autores também concluíram que para substituir o R-410A em condições extremas algumas modificações no sistema podem ser conduzidas ou podem ser usadas misturas de R-32 com hidrofluorolefinas (HFO). Estas misturas, também conhecidas como alcenos apresentam desempenho inferior ao R-32, mas são alternativas aceitáveis, levando em consideração o *GWP* e a inflamabilidade do fluido refrigerante.

Shah *et al.* (2017) elaboraram um estudo teórico que apresenta as oportunidades inerentes à melhoria da eficiência energética em paralelo com a transição de fluidos refrigerantes de baixo *GWP*. Com base na análise realizada para 19 países, que correspondem a cerca de 65% da demanda global de condicionadores, os autores identificaram as seguintes oportunidades:

1. A possibilidade da introdução de critérios referentes a fluidos refrigerantes de baixo *GWP*, como requisito nos programas de etiquetagem;
2. A introdução da métrica *SEER* para melhor refletir as condições reais de operação em condicionadores de ar tipo *split* com compressores de rotação variável;
3. O alinhamento dos cronogramas para a implementação dos IMEE com os cronogramas de políticas de gerenciamento de fluidos refrigerantes;
4. Ações paralelas que avaliam os riscos de segurança associados aos novos fluidos refrigerantes;
5. Boas práticas de manutenção e instalação de equipamentos;
6. Boas práticas no manuseio dos fluidos refrigerantes.

Os autores concluíram que embora alguns fluidos refrigerantes de baixo *GWP* apresentem preço mais elevado que os atuais, os custos associados aos fluidos refrigerantes representam apenas 1% do *CCV* do equipamento. Estes custos podem ser minimizados por meio de avanços na fabricação e incremento da eficiência energética, principalmente se estas melhorias forem apoiadas por políticas que incentivem o desenvolvimento tecnológico.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada no estudo dos impactos atribuídos aos IMEE mais restritivos e na transição de fluidos refrigerantes de baixo *GWP* em condicionadores de ar tipo *split* para o setor residencial brasileiro. Para atender os objetivos propostos, o presente capítulo está dividido em duas seções. A primeira, consiste na descrição do modelo *PAMS*. A segunda seção, descreve a utilização do índice *TEWI*, o qual avalia os impactos diretos e indiretos devido ao uso dos fluidos refrigerantes nos condicionadores de ar.

3.1 Modelo *PAMS*

O *PAMS* é um modelo consolidado e empregado em vários países para análise dos impactos dos IMEE mais restritivos. Segundo McNeil *et al.* (2007), os IMEE são políticas públicas que possibilitam ao governo alcançar uma economia financeira e reduzir o consumo de energia através do estabelecimento de requisitos mínimos de eficiência energética. O *PAMS* avalia os impactos dos IMEE mais restritivos assumindo que antes dos novos padrões serem implementados, todos os produtos no mercado operam com uma eficiência de linha de base (cenário de referência) e após a implementação dos novos requisitos, os equipamentos operam com um nível de eficiência energética superior (cenários IMEE) ao cenário de referência. O modelo, baseado em planilhas integradas (excel) avalia os custos e os benefícios dos IMEE mais restritivos sob a perspectiva dos consumidores, dos fabricantes e em nível nacional.

3.1.1 Perspectiva dos Consumidores

Para os consumidores, os impactos são avaliados em termos de *CCV*, conforme apresenta a Equação 3.1 e *payback*, Equação 3.3.

$$CCV = PA + \sum_{n=1}^L \frac{CO}{(1+DR)^n} \quad (3.1)$$

Onde:

CCV Custo de Ciclo de Vida [R\$];

PA Preço de compra do condicionador de ar [R\$];

L Vida útil (*lifetime*) [anos];

CO Custo operacional [R\$];

DR *Discount Rate* (Taxa de Desconto) para os consumidores [%];

n Ano para o qual o custo operacional está sendo avaliado.

A Equação 3.1 mostra que as duas principais entradas para a análise do *CCV* são o preço de compra (PA) e o custo operacional (CO) do equipamento. Para definir o preço de um equipamento mais eficiente, o custo de cada opção para o melhoramento do projeto é adicionado em relação ao preço do equipamento de referência (VENDRÚSCULO *et al.*, 2008). O CO do equipamento é calculado pela Equação 3.2.

$$CO = UEC \cdot P + \sum(I + M + RG) \quad (3.2)$$

Onde:

CO Custo Operacional [R\$];

UEC Consumo unitário de energia (*Unit Energy Consumption*) [kWh];

P Preço da energia elétrica [R\$/kWh];

I Custo de instalação [R\$];

M Custo de manutenção [R\$];

RG Custo da recarga de fluido refrigerante [R\$].

O consumo unitário de energia (UEC) e o preço da energia elétrica (P) são estimados constantes durante todo o período de análise. Estes parâmetros são definidos em função do incremento da eficiência energética.

O *payback* é um indicador de grande relevância a ser observado pelos consumidores. Este parâmetro representa o tempo de retorno econômico resultante das melhorias na eficiência energética.

$$payback = -\frac{\Delta P}{\Delta O} \quad (3.3)$$

Onde:

ΔP Variação do preço de varejo do equipamento [R\$];

ΔO Variação do custo operacional com energia elétrica [R\$].

3.1.2 Perspectiva dos Fabricantes

A análise de impactos dos IMEE mais restritivos sob a perspectiva dos fabricantes é baseada em um modelo de Fluxo de Caixa (FC) que avalia como os novos índices impactam os fabricantes nacionais em termos de investimentos, custos de produção e receitas resultantes do incremento da eficiência energética e da variação de preço do equipamento (LETSCHERT, *et al.* 2019). O modelo é baseado nas Receitas anuais (R) dos fabricantes,

referentes às vendas dos equipamentos com os novos IMEE, conforme mostra a Equação 3.4.

$$R = \sum_{vendas} PV \quad (3.4)$$

Onde:

R Receitas [R\$];

PV Preço de Venda dos fabricantes [R\$].

A viabilidade do investimento é avaliada através do $VPLI$ e ocorre em função das receitas anuais, conforme apresenta a Equação 3.5.

$$VPLI = FCL \cdot \left(\frac{1}{1+DR_f} \right)^{y_f - y_0} \quad (3.5)$$

Onde:

$VPLI$ Valor Presente Líquido para a Indústria [milhões de R\$];

FCL Fluxo de Caixa Livre [milhões de R\$];

DR_f *Discount Rate* (Taxa de Desconto) para os fabricantes [%];

y_f, y_0 Ano final e de referência, respectivamente.

O FCL é calculado pela Equação 3.6.

$$FCL = FC - DC - CCC \quad (3.6)$$

Onde:

FC Fluxo de Caixa [milhões R\$];

DC Despesa de Capital [milhões R\$];

CCC Custos de conversão de capital [milhões de R\$].

É importante salientar que a despesa de capital (DC) representa um valor padrão que ocorre em função das receitas e está relacionada com a compra das novas instalações, bens e equipamentos usados na produção dos condicionadores de ar mais eficientes. Os custos de conversão de capital (CCC) são os investimentos em instalações, bens e equipamentos resultantes das definições dos IMEE mais restritivos. O fluxo de caixa (FC) representa a movimentação financeira de uma empresa em um determinado período de tempo, conforme mostra a Equação 3.7.

$$FC = LOLAI - VCG \quad (3.7)$$

Onde:

$LOLAI$ Lucros Operacionais Líquidos Após os Impostos [milhões de R\$];

VCG Variação do Capital de Giro [milhões de R\$].

A variação do capital de giro (*VCG*) representa a movimentação do ativo circulante subtraído do passivo circulante entre um dado ano e o anterior. O modelo *PAMS* calcula o capital de giro baseado em um valor padrão, como uma porcentagem das receitas (LETSCHERT *et al.*, 2019).

A Equação 3.8 calcula os lucros operacionais líquidos após os impostos (*LOLAI*). O *LOLAI* é um parâmetro importante para o cálculo do *VPLI*.

$$LOLAI = LAJI \cdot (1 - TI) \quad (3.8)$$

Onde:

LAJI Lucro Antes de Juros e Impostos [milhões de R\$];

TI Taxa de Imposto [%].

O lucro antes dos juros e impostos (*LAJI*) é calculado pela Equação 3.9.

$$LAJI = R - \left(\frac{R}{ML}\right) - DG - CCE - AE \quad (3.9)$$

Onde:

R Receitas [milhões de R\$];

ML Margem de Lucro dos fabricantes [%];

DG Despesas Gerais [milhões de R\$];

CCE Custos de Conversão de Equipamentos [milhões de R\$];

AE Ativos Encalhados [R\$].

As despesas gerais (*DG*) são as despesas administrativas, de vendas, pesquisas e desenvolvimento obtidas na análise de engenharia para a definição dos IMEE mais restritivos. Os custos de conversão de equipamentos (*CCE*) correspondem aos investimentos realizados em pesquisas, desenvolvimento de produtos, testes, certificação e *marketing*. Estes investimentos são únicos e ocorrem antes da definição dos novos IMEE. Outros custos que são considerados são os ativos encalhados (*AE*), que representam as ferramentas e os equipamentos que se tornaram obsoletos (LETSCHERT *et al.*, 2019).

3.1.3 Previsão de Estoque Nacional

McNeil *et al.* (2007) pontuam que para avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos em nível nacional, deve-se contabilizar os condicionadores de ar em operação a cada ano e a sua taxa de reposição. Neste contexto, a posse (difusão) dos equipamentos é um parâmetro importante e que deve ser levado em consideração para prever o estoque nacional dos condicionadores de ar. Nos países em desenvolvimento a difusão (*dif*) é dinâmica e depende da renda das famílias, do grau de urbanização, de eletrificação e da variável climática

Cooling Degree Days (CDD). A *CDD* representa uma estimativa anual do número de horas nas quais é requerido o uso dos condicionadores de ar para resfriamento. A determinação da difusão permite o cálculo das projeções do estoque total e das vendas dos equipamentos. A difusão para os condicionadores de ar é calculada pela Equação 3.10.

$$dif = (1 - \gamma_{CDD} \cdot e^{(CDD \cdot \beta_3)}) \cdot \left(\frac{\alpha}{1 + \gamma \cdot e^{\beta_1 \cdot Rf}} \right) \quad (3.10)$$

Onde:

dif Difusão dos condicionadores de ar [%];

α Saturação dos condicionadores de ar [%];

CDD *Cooling Degree Days* (Graus Dias Resfriamento);

Rf Renda das famílias [R\$];

$\beta_1, \beta_3, \gamma, \gamma_{CDD}$ são os parâmetros de regressão para condicionadores de ar no Brasil. Os parâmetros de regressão foram desenvolvidos pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (COSTA *et al.*, 2019).

As vendas dos condicionadores de ar são impulsionadas pelo aumento do número de novas residências e pela substituição dos aparelhos antigos. Para os países em desenvolvimento, os efeitos combinados do rápido crescimento econômico, da taxa de urbanização, taxa de eletrificação e o aumento no número das residências são fatores que determinam a quantidade de equipamentos nas primeiras compras (*PC*), que é o principal fator de vendas. As primeiras compras ocorrem em função da difusão dos equipamentos, da população e do número de habitantes por família, conforme apresenta a Equação 3.11.

$$PC = \frac{pop(y) \cdot dif(y)}{HH(y)} - \frac{pop(y-1) \cdot dif(y-1)}{HH(y-1)} \quad (3.11)$$

Onde:

PC Primeiras Compras;

pop População [milhões de habitantes];

HH (*Household*) Número de Habitantes por família;

y Ano considerado.

Em adição às primeiras compras, o modelo *PAMS* descreve a substituição dos condicionadores de ar em função da Probabilidade de Sobrevivência (*PS*), que por sua vez, ocorre de acordo com a idade do equipamento, conforme mostra a Equação 3.12.

$$PS(i) = \frac{1}{1 + e^{(i-L)/D(i)}} \quad (3.12)$$

Onde:

PS Probabilidade de Sobrevivência [%];

i Idade do equipamento [anos];

L Vida útil [anos];

$D(i)$ Desvio médio das idades de substituição [2 anos].

Fridley *et al.* (2001) assumem que os condicionadores de ar apresentam uma probabilidade decrescente de sobrevivência à medida que envelhecem. A Figura 3.1 mostra a probabilidade de sobrevivência para os condicionadores de ar em função dos anos, desde a compra.

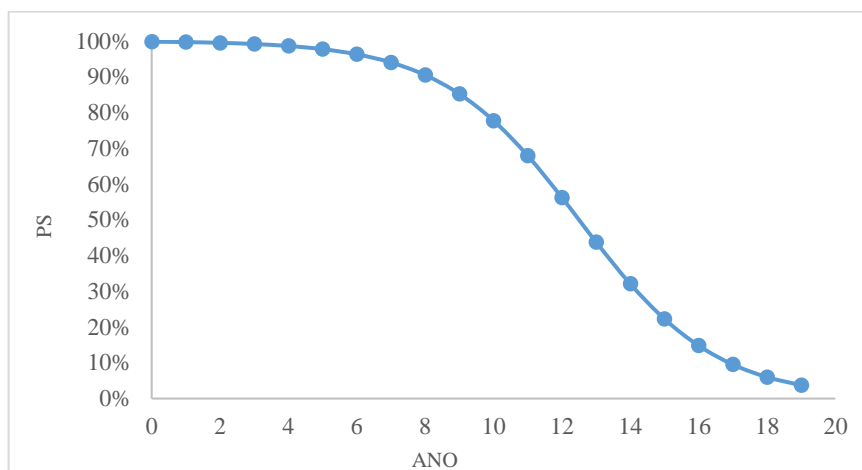


Figura 3.1. Probabilidade de sobrevivência em condicionadores de ar. Fonte: Adaptado de Fridley *et al.* (2001).

A probabilidade de sobrevivência é baseada em torno de uma vida útil de 15 anos. Assim, assume-se que todos os condicionadores de ar são eliminados no 16º ano.

As substituições (SUB) anuais são calculadas pela Equação 3.13.

$$SUB(y) = \sum_{i=1}^L S(y-1, i) \cdot PS(i) \quad (3.13)$$

Onde:

$S(y, i)$ Quantidade de equipamentos (por idade) em um dado ano.

As vendas (V) totais anuais é dada pela Equação 3.14.

$$V(y) = PC(y) + SUB(y) \quad (3.14)$$

O cômputo do estoque total é realizado com a atualização do número dos equipamentos antigos, conforme mostra a Equação 3.15.

$$S(y, i) = S(y-1, i-1) \cdot (1 - PS(i-1)) \quad (3.15)$$

3.1.4 Perspectiva Nacional

Os impactos dos IMEE mais restritivos sob a perspectiva nacional são avaliados em termos de Economia de Energia Nacional (*EEN*), Economia de Energia na Fonte Primária (*EEP*), Redução das Emissões de CO₂ (*RECO₂*), Redução na Demanda de Pico de Carga (*RPC*) e do Valor Presente Líquido (*VPL*). Para cada cenário proposto, os impactos nacionais são quantificados em relação ao cenário de linha de base.

A Equação 3.16 apresenta a *EEN*. Esta economia é avaliada anualmente comparando o consumo de energia (para todo o estoque nacional) do cenário de linha de base com os cenários IMEE.

$$EEN(y) = CEN(y)_{Linha\ de\ Base} - CEN(y)_{IMEE} \quad (3.16)$$

Onde:

EEN(*y*) Economia de Energia Nacional no ano *y* [TWh];

CEN(*y*) Consumo de Energia Nacional no ano *y* [TWh].

O consumo de energia para o estoque dos condicionadores de ar no ano (*y*) é dado pela Equação 3.17.

$$CEN(y) = \sum_i S(y, i) \cdot UEC(y, i) \quad (3.17)$$

O *UEC* é determinado pelo incremento da eficiência energética, conforme mostra a Equação 3.18. O *UEC* no condicionador de ar de linha de base difere daqueles que sofreram incremento na eficiência energética devido às melhorias na eficiência do equipamento.

$$UEC = UEC_{Linha\ de\ base} \cdot (eff_{Linha\ de\ base} / eff_{IMEE}) \quad (3.18)$$

Onde:

eff Eficiência anual do equipamento, conforme Equação 3.19.

$$eff(y) = eff_{LB} \cdot [(1 - R_{eff})^{y-y_0}] \quad (3.19)$$

Onde:

eff_{LB} Eficiência de linha de base do equipamento no ano (*y₀*);

R_{eff} Taxa anual de incremento de eficiência [%].

A Equação 3.20 mostra a *EEP*, a qual representa os insumos totais de energia devido ao uso de combustíveis fósseis necessários para a operação dos condicionadores de ar. Este parâmetro é calculado levando em consideração o *mix* de combustíveis para geração de energia elétrica e as perdas na transmissão e distribuição (*T&D*).

$$EEP = \frac{EEN}{1-TD} \times HR \quad (3.20)$$

Onde:

EEP Economia de Energia Primária [tep];

HR *Heat Rate* (Taxa de aquecimento) devido à geração de energia elétrica [%];

TD Perdas na Transmissão e Distribuição de energia elétrica [%].

A partir da economia de energia é calculada a redução das emissões de CO₂ (*RECO*₂), conforme mostra a Equação 3.21.

$$RECO_2 = \frac{EEN}{1-TD} \times \beta \quad (3.21)$$

Onde:

*RECO*₂ Redução nas emissões de CO₂ [Mt];

β Fator de emissão de Dióxido de Carbono [kg. CO₂/kWh].

A redução do pico de demanda também é avaliada em função da economia de energia obtida levando-se em consideração o fator de conversão. O fator de conversão, por sua vez é obtido através da análise da curva de carga para o setor residencial (MITSIDI, 2018).

O valor presente líquido (*VPL*) corresponde a uma série temporal de custos e economias trazidos para tempo presente (FRIDLEY *et al.*, 2001). O *VPL* avaliado em nível nacional é calculado pela Equação 3.22.

$$VPL = VP EE - VP CE \quad (3.22)$$

Onde:

VPL Valor Presente Líquido [milhões de R\$];

VP EE Valor Presente de Economia em Eletricidade [milhões de R\$];

VP CE Valor Presente de Economia nos Custos de Equipamentos [milhões de R\$].

O *VP EE* e *VP CE* são calculados pelas Equações 3.23 e 3.24, respectivamente.

$$VP EE_y = \sum (ECO_y \cdot FD_y) \quad (3.23)$$

$$VP CE_y = \sum (ECE_y \cdot FD_y) \quad (3.24)$$

Onde:

ECO Economias totais referente aos Custos Operacionais [milhões de R\$];

ECE Economias totais referente aos Custos dos Equipamentos [milhões de R\$];

y Ano considerado;

FD Fator de Desconto, dado pela Equação 3.25.

$$FD = \frac{1}{(1+DR_N)^{(yf-yp)}} \quad (3.25)$$

Onde:

DR_N *Discount Rate* (Taxa de Desconto) avaliados em nível nacional [%];

yf Ano considerado;

yp Ano de implementação dos novos IMEE.

3.2 Índice *TEWI*

O *TEWI* é um índice que estima as emissões de CO₂ ao longo da vida útil dos condicionadores de ar (FISCHER *et al.*, 1991). O índice *TEWI* contabiliza o impacto do aquecimento global com base nas emissões relacionadas aos GEE durante a operação e descarte dos condicionadores de ar. A unidade de medida do *TEWI* é dada em termos de massa de dióxido de carbono (CO₂). O índice *TEWI* é dividido em duas parcelas: 1) os impactos diretos, que correspondem às emissões devido às fugas dos fluidos refrigerantes para o meio ambiente (através de vazamentos) e 2) os impactos indiretos, que representam as emissões de CO₂ devido ao uso dos combustíveis fósseis necessários para gerar energia na operação dos equipamentos (AIRAH, 2012). A Equação 3.26 apresenta o cálculo do índice *TEWI*.

$$TEWI = [(GWP \cdot m \cdot L_v \cdot L) + GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha_r)] + [UEC \cdot \beta_M \cdot L] \quad (3.26)$$

Onde:

GWP Global Warming Potential [kg.CO₂];

m Massa de fluido refrigerante [kg];

L_v Taxa anual de vazamento [kg];

L Vida útil do condicionador de ar [anos];

α_r Fator de recuperação/reciclagem [0 a 100%];

UEC Unit Energy Consumption [kWh/ano];

β_G Fator global de emissão indireta de CO₂ [kg.CO₂/kWh].

Na escolha de um fluido refrigerante para os condicionadores de ar a compatibilidade com o óleo lubrificante do compressor, as pressões e temperaturas de trabalho e a flamabilidade são parâmetros que devem ser avaliados. No entanto, no contexto das emissões dos GEE, o índice *TEWI* é uma métrica adequada para a escolha do fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP*.

3.3 Desenvolvimento e Implementação das Premissas

As premissas para os Estudos de Caso, a criação dos cenários e a obtenção dos dados de entrada estão divididas em duas etapas, modelo *PAMS* e índice *TEWI*. O modelo *PAMS*

foi adaptado para inserção do incremento da eficiência energética devido ao uso do fluido refrigerante de baixo *GWP* (escolhido através do índice *TEWI*), substituto do atual R-410A.

3.3.1 Desenvolvimento dos Cenários para o Estudo de Caso I

Por ser o mais popular no setor residencial brasileiro, assume-se que o condicionador de ar de 12.000 *BTU/h* (3,51 kW) é o equipamento de linha de base representativo para todo o setor. O IMEE para o equipamento de linha de base é de 3,14 IDRS (3,02 *EER*), correspondente ao atual equipamento classe B do PBE (LETSCHERT *et al.*, 2019). A Tabela 3.1 apresenta a correlação entre a variação do preço de compra e do consumo anual de energia devido ao incremento da eficiência energética para os condicionadores de ar.

Tabela 3.1. Dados de Engenharia *LBNL*.

Eficiência	<i>EER</i> (W/W)	IDRS (W/W)	Preço (R\$)	<i>UEC</i> (kWh/ano)
Linha de Base	3,02	3,14	1.210,00	1.767
Nível de Eficiência 1	3,23	5,00	1.441,00	1.111
Nível de Eficiência 2	3,72	5,50	1.478,00	990
Nível de Eficiência 3	3,94	6,00	1.536,00	892
Nível de Eficiência 4	4,18	6,50	1.583,00	818
Nível de Eficiência 5	4,42	7,00	1.714,00	767

Fonte: Letschert *et al.* (2019).

A partir de uma série de combinações de análise de engenharia realizada pelo *LBNL* em condicionadores de ar fabricados no Brasil, o preço de compra dos equipamentos e o consumo anual de energia foram estimados para cada incremento de eficiência energética proposto. Os níveis de eficiência energética obtidos pela métrica *EER*, foram posteriormente convertidos para a IDRS. O preço de compra dos equipamentos e o consumo anual de energia variam em função dos níveis de eficiência energética.

Os cenários foram criados a partir dos dados da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE, 2018), do PBE para os condicionadores de ar tipo *split*. Considerando os níveis de eficiência energética da Tabela 3.1, selecionou-se todos os equipamentos com capacidade de 12.000 *BTU/h* aprovados pelo INMETRO no corrente ano, assumindo que esta é a participação de mercado no setor. Assim, os cenários propostos representam uma média de mercado para os níveis de eficiência energética disponíveis e são descritos com o índice (I), o qual se refere ao Estudo de Caso I, conforme apresenta a Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Participação de mercado para o Estudo de Caso I.

IMEE	Cenário de Linha de Base ₍₁₎	Cenário 1 ₍₁₎	Cenário 2 ₍₁₎	Cenário 3 ₍₁₎
Linha de Base	28,16%	-	-	-
Nível de Eficiência 1	71,26%	99,43%	-	-
Nível de Eficiência 2	0,57%	0,57%	100%	-
Nível de Eficiência 3	0,00%	0,00%	0,00%	100%
Nível de Eficiência 4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Nível de Eficiência 5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eficiência Média (W/W)	4,48	5,00	5,50	6,00
Preço Médio (R\$)	1.376,00	1.441,00	1.478,00	1.536,00
UEC Médio (kWh/ano)	1.295	1.111	990	892

Fonte: Elaboração própria, baseado em Letschert *et al.* (2019).

Para o cenário de linha de base, o IMEE que representa o IDRS é de 3,14 W/W, conforme já discutido. No cenário 1₍₁₎, todos os equipamentos que se encontram no nível de eficiência de linha base (28,16%) são transferidos para o próximo nível de eficiência energética IDRS=5,00 W/W. O mesmo ocorre nos cenários 2₍₁₎ e 3₍₁₎, nos quais os IMEE para estes cenários são IDRS=5,50 W/W e IDRS=6,00 W/W, respectivamente. No cenário 2₍₁₎, a participação dos equipamentos que saltam para o próximo nível de IMEE é de 99,43%, ao passo que para o cenário 3₍₁₎, 100% dos equipamentos sofrem alterações. A eficiência de mercado, o preço e o consumo anual foram obtidos através de uma média ponderada pela participação de mercado. Os resultados obtidos representam os condicionadores de ar de referência em cada cenário no Estudo de Caso I.

3.3.2 Dados de Entrada - Perspectiva dos Consumidores e em Nível Nacional

Baseado nos estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), assume-se que a vida útil dos condicionadores de ar é de 15 anos (EPE, 2018). A vida útil do equipamento é constante tanto para o cenário de linha de base como para os cenários IMEE. Assume-se também que os condicionadores de ar perdem 10% de seu desempenho, a partir do quinto ano de sua vida útil (CARDOSO, 2012). Estas perdas ocorrem devido ao desgaste natural dos componentes móveis e fixos dos equipamentos.

O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) é composto por geração, transmissão e distribuição de energia. As perdas elétricas devem ser levadas em consideração e representam a energia elétrica gerada que passa pela rede de transmissão e distribuição e, no entanto, não é comercializada. As perdas são classificadas em duas categorias: técnicas e comerciais. As perdas técnicas estão relacionadas com o efeito Joule, perdas no núcleo dos transformadores e perdas dielétricas. As perdas comerciais estão relacionadas com as ligações clandestinas

da rede ou fraudes na obtenção da energia elétrica. As perdas técnicas e comerciais no transporte e distribuição (T&D) são de 7,5% e 6,6%, respectivamente, totalizando uma perda total de 14,1% (ANEEL, 2019).

As tarifas de eletricidade para o setor residencial foram estimadas a partir do subgrupo B1-Residencial, com a modalidade tarifária convencional, conforme Resolução Homologatória da ANEEL, nº 2.797/2019, de 17 de Novembro de 2020, que estabeleceu a tarifa final de 0,6275 R\$/kWh, no corrente ano.

O fator de eficiência média das usinas termelétricas caracteriza as perdas na geração de energia. Considerando o ano de 2016, as perdas foram estimadas em 58,4%. A eficiência energética não apresenta influência direta nas perdas de geração, no entanto, o incremento da eficiência energética nos condicionadores de ar, reduz a demanda por energia, principalmente nos horários de pico (MITSIDI, 2018).

O fator de emissão de CO₂ representa a margem de operação das usinas que utilizam combustíveis fósseis para acionamento complementar das usinas hidroelétricas e demais fontes renováveis. De acordo com Rupp & Lamberts (2017), o fator de emissão de CO₂ adotado é de 0,09 kgCO₂/kWh, que representa o fator de emissão para a geração de energia elétrica conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

O crescimento macroeconômico é um dado de grande relevância, pois a partir dele pode-se estimar os cenários referentes às vendas e ao uso dos condicionadores de ar. Como premissa, adotou-se o crescimento macroeconômico de 3%, que representa a média para os países latino-americanos (DEPC, 2018). Os dados microeconômicos estão divididos na taxa de desconto para os consumidores e em nível nacional. A taxa de desconto para os consumidores é de 5,4%, que representa a taxa média de juros para pagar o custo adicional na aquisição de um equipamento mais eficiente (COSTA, 2019). A taxa de desconto nacional (SELIC) foi obtida a partir do Banco Central, cujo valor, para o mês de março de 2021, corresponde a 2,75% (BANCO CENTRAL, 2021).

Quanto aos custos operacionais, o valor referente à instalação do condicionador de ar é considerado constante para todos os cenários. O valor médio da instalação varia entre as regiões brasileiras. No entanto, o valor de R\$ 599,00 reflete as despesas totais médias com a instalação do equipamento, incluindo o fornecimento de componentes elétricos, hidráulicos e frigoríficos (MITSIDI, 2018). Considerando o perfil dos usuários de condicionadores de ar, assume-se que é realizada uma manutenção preventiva completa (R\$

150,00) a cada dois anos e são realizadas duas recargas de fluido refrigerante (R\$ 250,00) ao longo da vida útil do equipamento.

A Tabela 3.3 sintetiza os principais dados de entrada para a análise dos impactos sob a perspectiva dos consumidores e em nível nacional. Na ausência de dados mais recentes foram utilizados aqueles que mais se aproximam de 2021, que é o período inicial das simulações propostas.

Tabela 3.3. Dados de entrada para análise de impactos para os consumidores e em nível nacional.

Dado de Entrada	Variável	Valor	Fonte
Vida útil	L	15 anos	EPE, 2018
Preço da Eletricidade	P	0,54 R\$/kWh	ANEEL, 2019
Perdas no Transporte e Distribuição	$T&D$	14,1 %	ANEEL, 2019
Fator de Emissão de CO ₂	β	0,09 kgCO ₂ /kWh	RUPP & LAMBERTS, 2017
Fator de Geração	FC_B	58,4%	Mitsidi, 2018
Instalação	I	R\$ 599,00	Mitsidi, 2018
Manutenção	M	R\$ 150,00	Estimativas de Mercado
Recarga de Fluido Refrigerante	RG	R\$ 250,00	Estimativas de Mercado
Taxa de desconto (Residencial)	DR	5,4 %	Costa, 2019
Taxa SELIC	DR_N	2,75 %	Banco Central, 2021

Fonte: Elaboração própria.

3.3.3 Dados de Entrada - Previsão do Estoque Nacional

A projeção do estoque nacional e das vendas dos condicionadores de ar é uma etapa fundamental, pois determina a quantidade de equipamentos em operação em cada ano. Nesta etapa é estimada a taxa de substituição dos equipamentos antigos e ineficientes, por novos e mais eficientes.

A difusão dos condicionadores de ar foi obtida através da Equação 3.10 e calibrada para os valores reais encontrados para os anos de 1997, 2000 e 2005. Para os demais anos nos quais não foram encontradas estimativas ou valores reais, uma interpolação simples para prever a difusão nestes períodos foi realizada. Os parâmetros de regressão são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Parâmetros de regressão para difusão de condicionadores de ar no Brasil.

Parâmetros	Descrição	Resultados <i>LBNL</i>
α	Saturação	1
β_1	Renda	-7.10^{-05}
β_3	Urbanização	-2.10^{-03}
γ	Coefficiente de Correlação	127
CDD	<i>Cooling Degree Days</i>	2015
Rf	Renda das famílias	Projeções anuais (MITSIDI, 2018)

Fonte: Letschert *et al.* (2019).

A Figura 3.2 apresenta os resultados encontrados através do modelo de difusão dos condicionadores de ar para os anos de 2010 a 2035.

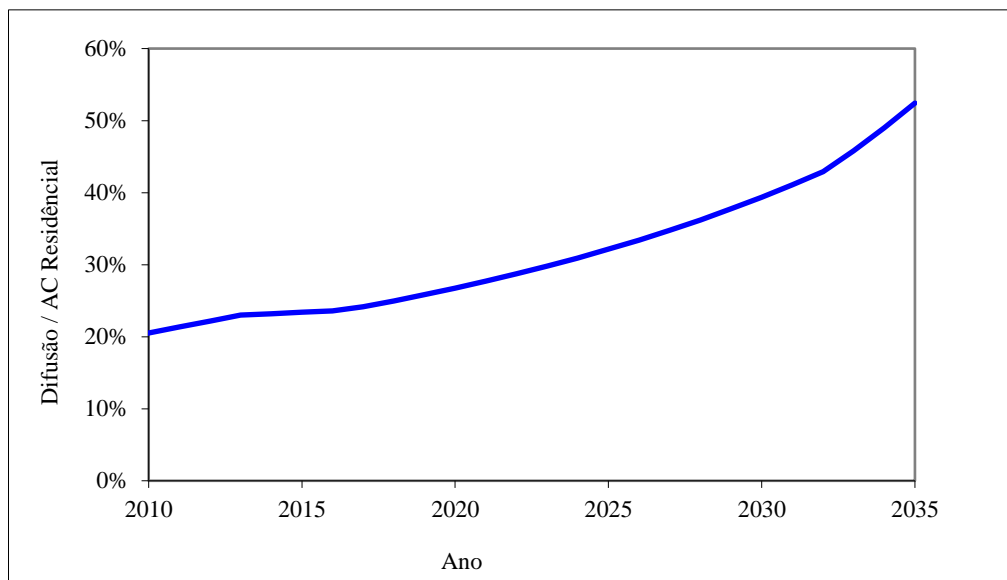


Figura 3.2. Difusão dos condicionadores de ar para o setor residencial.

A projeção da difusão em condicionadores de ar ocorre devido às tendências de crescimento pelas novas propriedades (novas residências), à relativa facilidade de financiamento na compra de novos equipamentos e às tendências do aumento da temperatura global. O modelo *PAMS* estima as previsões de vendas levando em consideração a difusão e as substituições dos equipamentos para um dado ano. Para os casos nos quais os dados de vendas ou estimativas estão disponíveis, estes foram lançados diretamente no modelo. Os dados de vendas para os anos de 2012 a 2017 foram obtidos a partir de Euromonitor (COSTA *et al.*, 2019). A projeção das vendas para os anos de 2018 a 2035 foi desenvolvida assumindo um crescimento econômico de 3%. O resultado está apresentado na Figura 3.3.

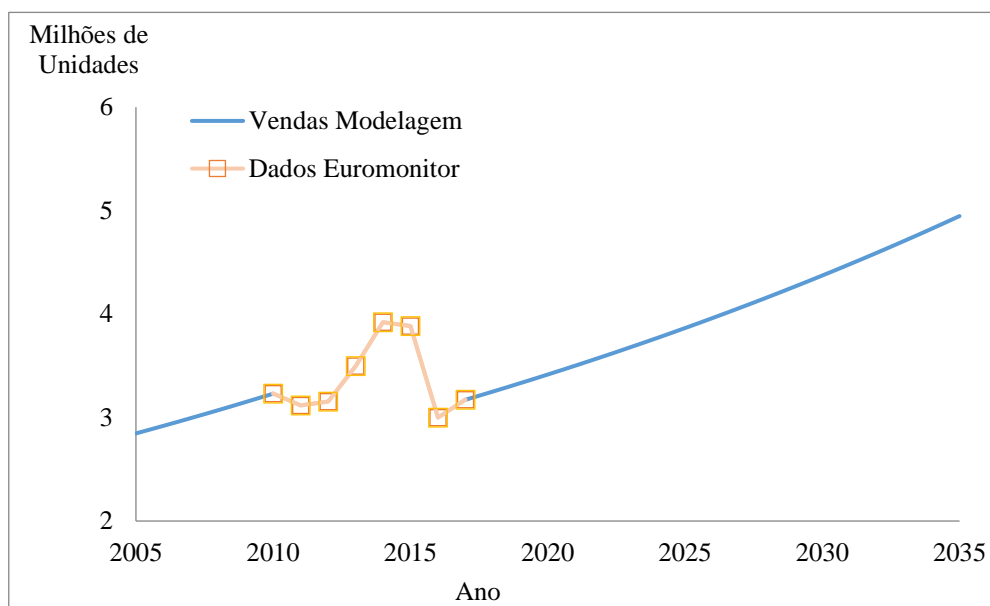


Figura 3.3. Projeção das vendas de condicionadores de ar.

As variações ocorridas nos anos de 2010 até 2016 são valores de vendas reais dos condicionadores de ar. O decréscimo nas vendas dos equipamentos observado nos anos de 2014 a 2015 ocorreu, dentre outros fatores, devido à crise política e financeira ocorrida naquele período. No entanto, a partir de 2015, o número dos condicionadores de ar vendidos voltou a apresentar crescimento e com uma projeção de aumento ainda maior no futuro.

3.3.4 Dados de Entrada - Perspectiva dos Fabricantes

Os dados para a análise de impactos dos IMEE mais restritivos para os fabricantes são em grande parte sigilosos, aos quais o acesso é possível somente com a autorização dos próprios fabricantes. Por se tratar de dados estratégicos para as empresas, muitos destes não são disponibilizados. Por esta razão, os dados utilizados para análise de impactos para os fabricantes foram obtidos através do estudo realizado pela força tarefa (*LBNL, IEI e ICS*) e estão sumarizados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Dados de entrada para análise de impactos para os fabricantes.

Dado de Entrada	Variável	Valor	Fonte
Taxa de Imposto para os Fabricantes	TI	8,5%	Letschert <i>et al.</i> , 2019
Taxa de Desconto para os Fabricantes	DR _I	10%	Letschert <i>et al.</i> , 2019
Margem de Lucro para os Fabricantes	ML	36%	Letschert <i>et al.</i> , 2019
Margem de Lucro - Canais de Distribuição	ML _D	59%	Letschert <i>et al.</i> , 2019
<i>Market Share</i> - Fabricantes Locais	MS	90%	Letschert <i>et al.</i> , 2019
Pesquisa e Desenvolvimento	P&D	3%	MCTIC, 2014
Despesas de Vendas, Administrativas e Gerais	DVAG	14%	USDOE, 2016
Capital de Giro	CG	10%	USDOE, 2016
Despesas de Capital	DC	2%	USDOE, 2016

Fonte: Elaboração própria.

A taxa de imposto para os fabricantes representa uma porcentagem dos ganhos antes dos impostos, ao passo que para os demais dados de entrada, as porcentagens são estimadas a partir das receitas anuais (LETSCHERT *et al.*, 2019). Os custos de conversão de capital, custos de conversão de equipamentos e ativos encalhados, são constantes calculadas para cada cenário e escalonadas pela quantidade dos equipamentos que sofreram alterações nos IMEE, conforme apresenta a Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Custos para os fabricantes na implementação de eficiência energética.

R\$ Milhões	Cenário 1 _(I)	Cenário 2 _(I)	Cenário 3 _(I)
Custos de Conversão de Produtos	16,20	63,10	63,40
Custos de Conversão de Capital	5,85	20,60	20,80
Ativos Encalhados	1,60	5,70	5,80

Fonte: Estimativas próprias, baseado em Letschert *et al.* (2019).

Os custos de conversão, da mesma maneira que os ativos encalhados foram obtidos a partir da quantidade de equipamentos de linha de base que sofreram alterações nos IMEE. Para estes equipamentos são contabilizados os respectivos custos financeiros na transição.

3.3.5 Dados de Entrada - Análise do Índice TEWI

Devido a sua grande participação, como premissa assume-se que o equipamento de referência utiliza o fluido refrigerante HFC R-410A. Para os condicionadores de ar de mesma capacidade, a carga de fluido refrigerante apresenta pequenas variações entre os fabricantes. À medida que a capacidade frigorífica de um equipamento aumenta, a carga de fluido refrigerante apresenta um acréscimo significativo. Tomando como referência o equipamento de 1 TR (12.000 BTU/h), a carga nominal do fluido refrigerante foi estimada levando em consideração as especificações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes. A Figura 3.4 apresenta a carga de fluido refrigerante em função da capacidade do condicionador de ar para os fabricantes com maior participação de mercado.

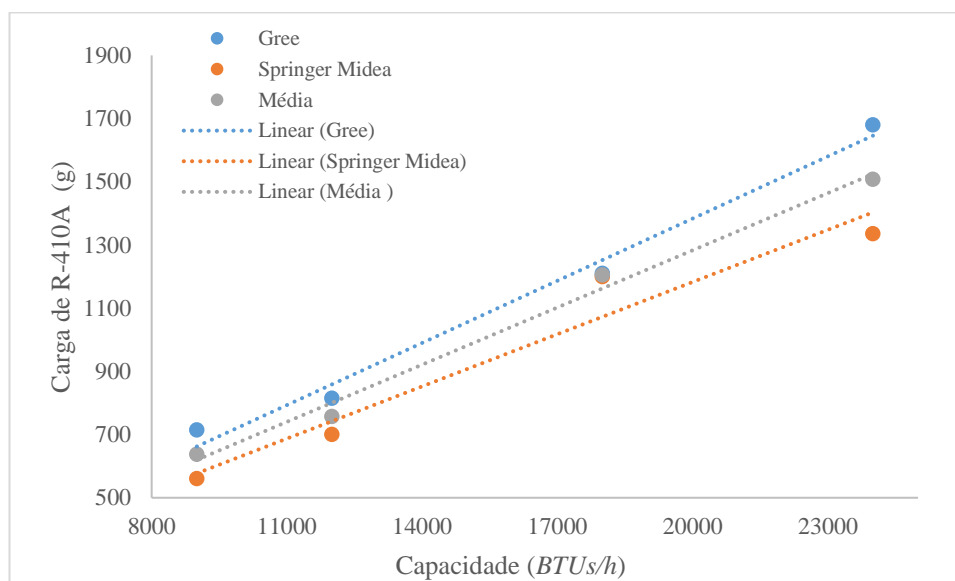


Figura 3.4. Carga média de fluido refrigerante.

A carga de fluido refrigerante para o equipamento de linha de base foi obtida através de uma média aritmética da carga de condicionadores de ar tipo *split* disponibilizada pelos fabricantes, obtendo assim o valor de 0,758 kg. A quantidade de fluido refrigerante dos condicionadores de ar e a eficiência energética variam em função do tipo de fluido refrigerante (ABDELAZIZ & SHRESTHA, 2016), conforme mostra a Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Variação da eficiência energética e da carga de fluido refrigerante.

Fluido Refrigerante	Variação na Eficiência Energética (Δ IDRS)	Variação na carga de refrigerante (Δ m)	IDRS W/W	Refrigerante kg
R-410	-	-	3,14	0,758
ARM-71A	-1 %	-18 %	3,10	0,621
DR-55	+3 %	-13 %	3,23	0,659
R-32	+4 %	-24 %	3,26	0,576
L-41	-5 %	-16 %	2,98	0,636
HPR-2A	-2 %	-14 %	3,07	0,651

Fonte: Abdelaziz & Shrestha (2016).

É importante destacar que os testes realizados para os fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP* foram realizados pelos autores em um condicionador de ar com capacidade de 18.000 *BTU/h*. O R-410A foi utilizado como referência e a partir dele cinco fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP* foram avaliados. As variações da eficiência energética e da carga de fluido refrigerante foram obtidas pelo *AHRI*, baseados na ISO 5151. Estas condições são as que mais se aproximam das condições padrões de ensaio para análise de eficiência energética em condicionadores de ar no Brasil: temperatura de bulbo seco do ambiente externo de 35 °C, temperatura de bulbo seco do ambiente interno de 19,4 °C e

umidade relativa de 50,9%. Assim, assume-se que a mesma tendência é observada em equipamentos com menores capacidades (12.000 *BTU/h*) e que não há variações significativas no preço do equipamento na transição para os novos fluidos refrigerantes.

As perdas de fluido refrigerante nos condicionadores de ar ocorrem em função das falhas dos componentes frigoríficos, corrosão, falhas nos trocadores de calor, pontos de solda e conexões (GALLAGHER *et al.*, 2014). Durante a vida útil do equipamento, assume-se uma taxa anual de vazamento de 3% em relação à massa inicial de fluido refrigerante (MAKHNATCH & KHODABANDEH, 2014). Os dados para a contabilidade das emissões diretas e indiretas pelo índice *TEWI*, são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Dados de entrada para a contabilidade do índice *TEWI*.

Parâmetros	Descrição	Resultados <i>LBNL</i>	Fonte
<i>GWP</i>	<i>Global Warming Potential</i>	Tabela 1.2	Shah <i>et al.</i> , 2015
L_v	Taxa anual de vazamento	3%	Makhnatch & Khodabandeh, 2014
<i>L</i>	Vida útil	15 anos	EPE, 2018
<i>m</i>	Massa de fluido refrigerante	0,758 kg	Estimativa própria
α_r	Fator de recuperação/reciclagem	70%	AIRAH, 2012
<i>UEC</i>	Consumo anual de energia	Tabela 4.1	Letschert <i>et al.</i> , 2019
β_G	Fator global de emissão de CO ₂	0,437 kg/kWh	Mitsidi, 2018

Fonte: Elaboração própria.

O fator de recuperação implica em uma porcentagem de fluido refrigerante que é reutilizado ao final da vida útil do equipamento (MAYKOT *et al.*, 2004). A massa de fluido refrigerante e o consumo anual de energia nos condicionadores de ar com fluidos de baixo *GWP* foram reajustadas pelas variações apresentadas na Tabela 3.7.

4 RESULTADOS

A motivação para a implementação dos IMEE mais restritivos em condicionadores de ar ocorre pela recomendação da *CLASP* que estabelece um aumento de 5% a 10% na eficiência energética a cada dois anos. Os IMEE mais restritivos garantem que os níveis de etiquetagem do PBE caminhem com as tecnologias disponíveis no mercado internacional. Assim, a distinção dos produtos de alta eficiência incentiva a aquisição por parte dos consumidores de equipamentos mais eficientes (*CLASP*, 2019).

A partir do modelo *PAMS* e do índice *TEWI* apresentados no capítulo 3, uma ferramenta computacional de planilhas integradas foi utilizada para avaliar os impactos dos IMEE mais restritivos e a participação referente à transição para os fluidos refrigerantes de baixo *GWP*. O recorte das análises está dividido em três etapas, conforme a seguir.

1. Estudo de Caso I: Análise dos impactos para os consumidores, fabricantes e em nível nacional considerando os IMEE mais restritivos através do modelo *PAMS*;
2. Fluidos refrigerantes: Análise das emissões diretas e indiretas de CO₂ pelo índice *TEWI*, para estimar o fluido refrigerante mais adequado para substituir o atual R-410A, seguido da análise dos impactos ambientais na transição dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP* em nível nacional;
3. Estudo de Caso II: Após a seleção do fluido refrigerante alternativo, os impactos para os consumidores, fabricantes e em nível nacional com IMEE mais restritivos são avaliados em conjunto com o fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* escolhido. A seguir um estudo comparativo entre os Estudos de Caso I e II é realizado. Esta análise tem por objetivo estimar a participação do fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP*.

4.1 Estudo de Caso I - Análise de Impactos dos IMEE

Os IMEE mais restritivos são avaliados sob a perspectiva dos consumidores, fabricantes e em nível nacional. O período total da análise corresponde a 15 anos, com início em 2021 e término em 2035.

4.1.1 Consumidores

Os impactos para os consumidores são avaliados pela relação do custo no incremento da eficiência energética e dos benefícios obtidos na economia de energia ao longo da vida

útil do condicionador de ar. Os custos são vinculados à utilização do equipamento, desde sua aquisição até o sucateamento. A Tabela 4.1 apresenta os resultados para o incremento dos IMEE mais restritivos nos cenários do Estudo de Caso I.

Tabela 4.1. Análise de impactos para os consumidores.

Nível de Eficiência	IDRS (W/W)	Preço (R\$)	UEC (kWh/ano)	CCV (R\$)	Economia de CCV (R\$)	Payback (Anos)
Linha de Base	4,48	1.376,00	1.295	10.461,00	-	-
Cenário 1 ₍₁₎	5,00	1.441,00	1.111	9.538,00	923,00	0,67
Cenário 2 ₍₁₎	5,50	1.478,00	990	8.930,00	1.531,00	0,63
Cenário 3 ₍₁₎	6,00	1.536,00	892	8.465,00	1.997,00	0,75

Fonte: Elaboração própria.

Os custos incrementais (preço dos condicionadores de ar) das opções de engenharia aumentam em função do incremento da eficiência energética. No entanto, Taylor *et al.* (2015) pontua que em outros países e para outros equipamentos, a prática demonstrou que as políticas nos incrementos da eficiência energética não aumentaram os preços ajustados pela inflação ao longo do tempo e podem até mesmo apresentar uma redução.

O *UEC* apresenta uma redução com o acréscimo da eficiência energética. Para o cenário de maior eficiência (cenário 3₍₁₎), o consumo anual de energia é de 892 kWh. No entanto, a análise do *CCV* é o principal parâmetro a ser analisado pelos consumidores, uma vez que este representa todos os gastos ao longo da sua vida útil do equipamento (compra, consumo de energia, instalação, manutenção entre outros).

A Figura 4.1 apresenta o *CCV* e as economias no *CCV* atingidas para cada cenário em relação ao cenário de linha de base. Em todos os cenários, benefícios positivos para os consumidores referentes à redução no *CCV* são obtidos. Entretanto, o maior benefício é atingido no cenário 3₍₁₎, dado que apresenta a maior economia (R\$ 1.997,00) de *CCV*.

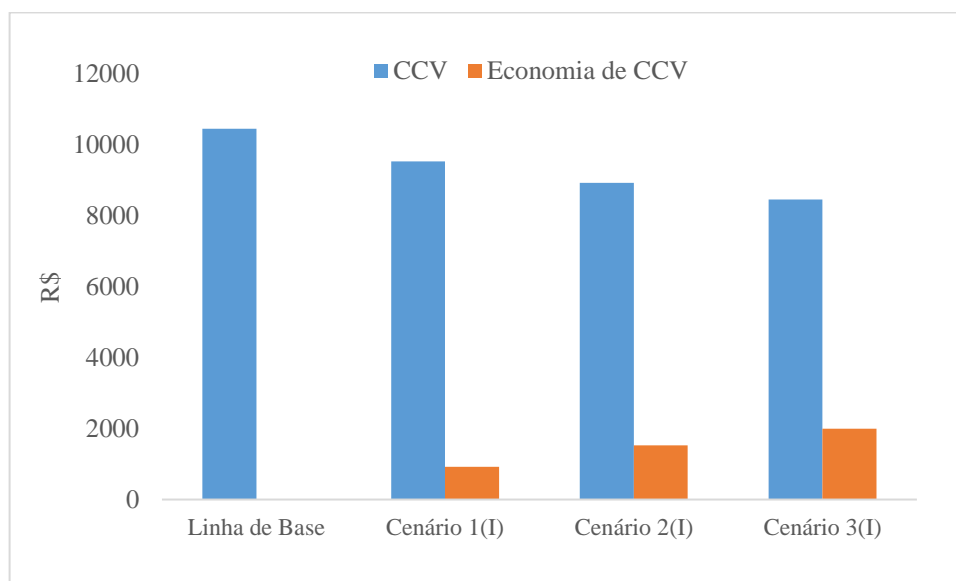


Figura 4.1. Análise do CCV e economia no CCV.

Levando em consideração o tempo de retorno do investimento (*payback*) verifica-se que o cenário 2_(I) apresenta o melhor resultado devido à moderada eficiência e ao relativo baixo custo do equipamento. No cenário 3_(I), no entanto, o *payback* é ligeiramente superior ao cenário 2_(I) em função do maior incremento no preço do equipamento. Em todos os cenários, os *paybacks* são inferiores a um ano, os quais tornam estes valores satisfatórios para os consumidores.

4.1.2 Fabricantes

Os investimentos nos custos de conversão de capital e custos de conversão de produtos são realizados nos anos anteriores ao de implementação dos equipamentos mais eficientes. Estes custos estão segmentados em duas partes. Metade do investimento é realizado em 2019 e o restante em 2020. Os ativos encaçados são custos únicos que ocorrem no ano de implementação (2021) dos novos IMEE.

O principal indicador que avalia os impactos dos IMEE mais restritivos para os fabricantes é a análise *FCL*. A Figura 4.2 apresenta os resultados do *FCL* para o Estudo de Caso I em relação ao cenário de linha base.

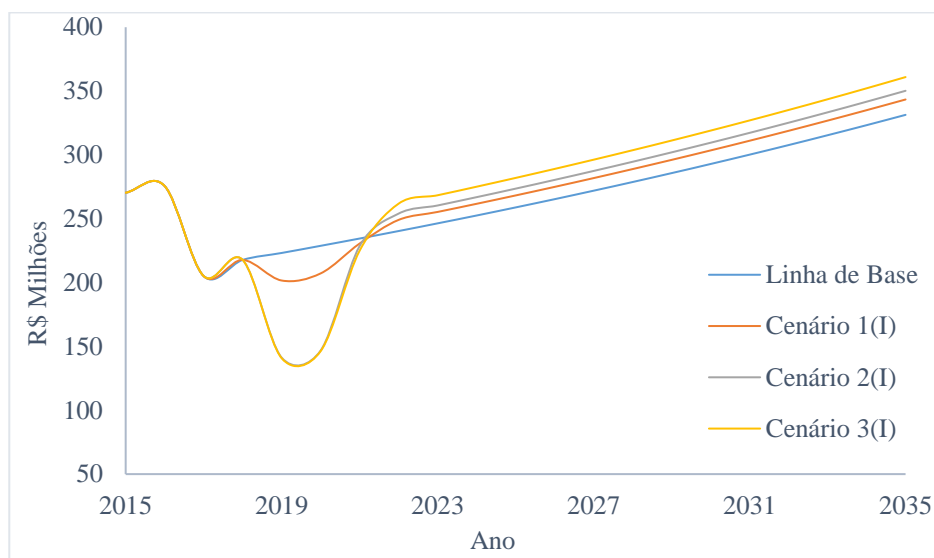


Figura 4.2. *FCF* com IMME entrando em vigor em 2021.

A redução no *FCL* observada nos anos de 2018 a 2021 resulta dos investimentos realizados pelos fabricantes para atingir o nível de eficiência energética proposto em cada cenário. O *FCL* é reduzido neste período de transição. Devido à elevação do preço dos equipamentos com os IMEE mais restritivos, o *FCL* aumenta em função das receitas adquiridas pelas vendas dos novos condicionadores de ar, mais eficientes. No cenário 3_(I) o *FCL* atinge aproximadamente R\$ 350 milhões. No entanto, a viabilidade econômica para os fabricantes é um parâmetro importante não contabilizado pelo *FCL*. Este é realizado através do *VPLI*. A Tabela 4.2 apresenta a variação do *VPLI* para o Estudo de Caso I.

Tabela 4.2. Análise da viabilidade econômica para os fabricantes.

	Cenário 1 _(I)	Cenário 2 _(I)	Cenário 3 _(I)
(R\$ milhões)	26,7 > 0	- 49,9 < 0	9,7 > 0

Fonte: Elaboração própria.

A viabilidade do investimento para os fabricantes é positiva para os cenários 1_(I) e 3_(I). Embora ambos os cenários sejam positivos, para o cenário 1_(I), a variação do *VPLI* é maior em comparação com o cenário 3_(I). Este fato ocorre pela baixa participação (28,16%) dos equipamentos que sofreram mudanças na eficiência energética, que implica em pequeno investimento realizado pelos fabricantes. O cenário 3_(I) apresenta elevados custos de investimentos em função da alta participação dos equipamentos com IMEE mais restritivos (100%). Contudo, a elevação dos preços dos equipamentos devido aos novos IMEE garante a viabilidade do investimento para este cenário. À medida que os IMEE mais restritivos são implementados, há uma tendência de crescimento na variação do *VPLI*.

Para o cenário 2_(I), observa-se um comportamento diferente, uma vez que o *VPLI* é negativo. Neste cenário, demonstra-se que a transição de grande parte dos condicionadores de ar (99,43%) para moderadas melhorias na eficiência energética não é vantajosa para os fabricantes, visto que implica em investimentos muito altos, não recuperados no futuro com o praticado preço do equipamento.

4.1.3 Nacional

Os impactos sob a perspectiva nacional representam uma ampliação dos resultados obtidos para os consumidores avaliados para todo o estoque dos condicionadores de ar. Estes impactos são avaliados a partir de 2021, após a implementação dos novos IMEE. A Figura 4.3 apresenta a evolução anual do consumo de energia avaliado para todo o estoque nacional no Estudo de Caso I.

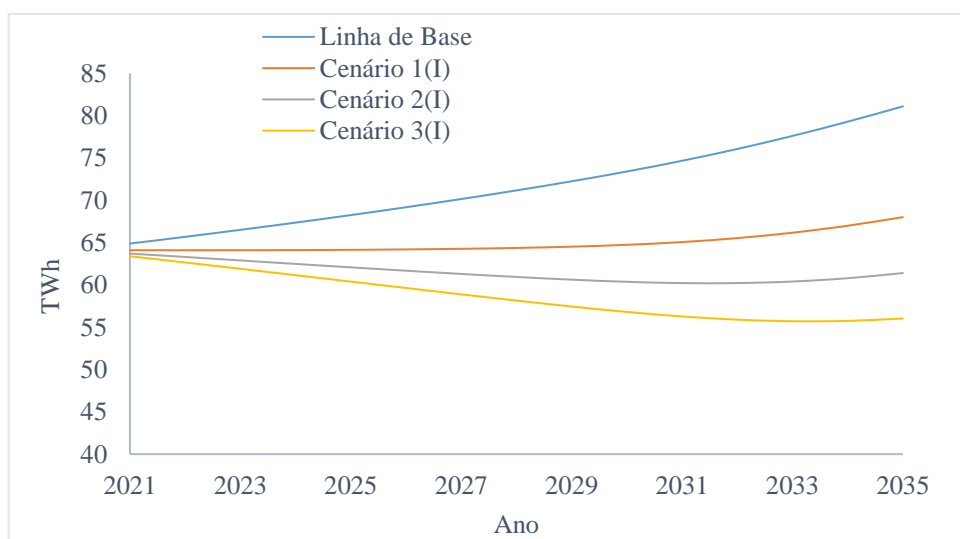


Figura 4.3. Evolução do consumo anual de energia elétrica.

A projeção do consumo anual de energia apresenta uma redução para todos os cenários em relação à linha de base. No entanto, maior economia é observada para o cenário 3_(I), conforme apresenta a Figura 4.4.

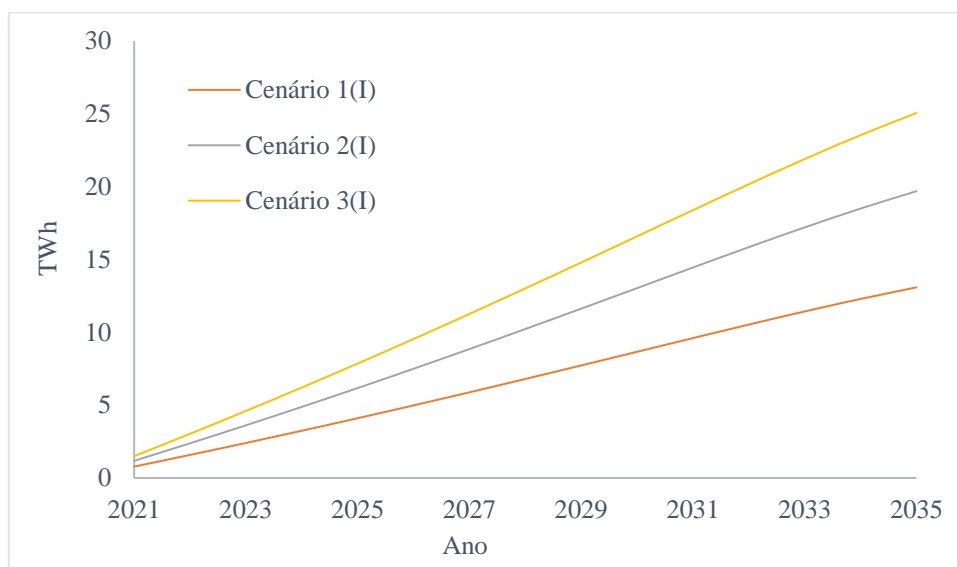


Figura 4.4. Economia anual de energia elétrica.

A redução no consumo de energia elétrica apresenta resultados modestos nos anos iniciais na implementação dos novos IMEE. Porém, à medida que os condicionadores de ar mais eficientes são introduzidos no mercado, aumenta a redução do consumo de energia em relação ao cenário de linha de base. Para o ano de 2035, por exemplo, a redução do consumo de energia no cenário 3_(I) atinge o valor de aproximadamente 24 TWh. Este valor representa cerca 56% do consumo de energia nacional registrado em novembro de 2019 (EPE, 2019).

Os impactos pela redução do consumo de energia elétrica nos condicionadores de ar avaliados em nível nacional são sumarizados na Tabela 4.3. Os resultados são apresentados através de uma evolução anual e consolidados de modo cumulativo para os anos de 2025, 2030 e 2035.

Tabela 4.3. Impactos energéticos para IMEE mais restritivos.

	Ano	Cenário 1 _(I)	Cenário 2 _(I)	Cenário 3 _(I)
Economia de Energia (GWh)	2025	3.308	5.465	7.218
	2030	6.983	11.537	15.238
	2035	10.548	17.427	23.017
Economia de Energia Acumulada (GWh)	2025	9.766	16.135	21.311
	2030	37.210	61.478	81.200
	2035	83.111	137.314	181.364
Demanda de Pico de Carga Evitada (MW)	2025	1.166	1.927	2.545
	2030	2.463	4.069	5.374
	2035	3.720	6.146	8.117

Fonte: Elaboração própria.

Tomando como referência o cenário 3_(I), estima-se uma economia na demanda de pico de 2.545, 5.375 e 8.117 MW, para os anos de 2025, 2030 e 2035, respectivamente. Para o

ano de 2035, a redução da demanda de pico de carga equivale aproximadamente a 60% da potência instalada da Usina Hidrelétrica de Itaipú.

Os impactos ambientais são estimados pela redução das emissões na fonte de geração e de CO₂. A Tabela 4.4 apresenta os resultados cumulativos na redução das emissões para os anos de 2025, 2030 e 2035.

Tabela 4.4. Impactos ambientais para IMEE mais restritivos.

	Ano	Cenário 1 ₍₁₎	Cenário 2 ₍₁₎	Cenário 3 ₍₁₎
Economia de Energia na Fonte de Geração (<i>Mtep</i>)	2025	1,7	2,8	3,7
	2030	6,4	10,5	13,9
	2035	14,2	23,5	31,1
Redução das Emissões de CO ₂ (Mt)	2025	1,0	1,7	2,2
	2030	3,9	6,4	8,5
	2035	8,7	14,4	19

Fonte: Elaboração própria.

A economia de energia na fonte de geração para o ano de 2035 (31,1 *Mtep*) representa uma redução significativa na queima de combustíveis fósseis. Os resultados obtidos para o cenário 3₍₁₎ são equivalentes à redução na queima de aproximadamente 213 milhões de barris de petróleo. Segundo a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), o consumo para o ano de 2020, ultrapassou os 100 milhões de barris por dia. Por conseguinte, as reduções obtidas até o ano de 2035, correspondem aproximadamente, à produção mundial de três dias de petróleo.

Ainda para o ano de 2035, as reduções acumuladas das emissões de CO₂ atingem o valor de 19 Mt. Este valor corresponde a aproximadamente 4 % das emissões emitidas no Brasil, tomando como referência o ano de 2014 (MME, 2015).

A Figura 4.5 apresenta os custos e os benefícios avaliados em nível nacional para o cenário 3₍₁₎. Os custos totais referentes ao preço dos equipamentos representam os gastos adicionais obtidos pela substituição dos condicionadores de ar mais baratos e ineficientes, por equipamentos mais caros e eficientes. Os custos totais com energia são estimados em função da economia obtida pela introdução dos equipamentos mais eficientes. Condicionadores de ar mais eficientes implicam em custos adicionais no momento da compra, no entanto, maior economia de energia ao longo da vida útil dos equipamentos é obtida. Os impactos econômicos são positivos quando a redução no custo de energia dos condicionadores de ar é maior que o custo dos equipamentos.

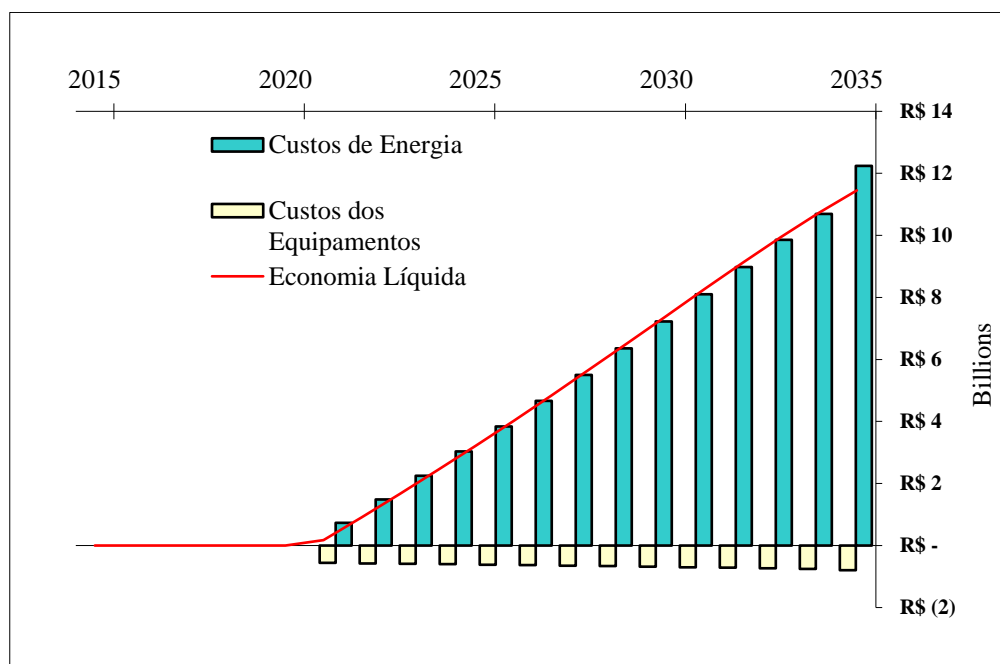


Figura 4.5. Economia de custos para o cenário 3₍₁₎.

Os resultados obtidos para os cenários 1₍₁₎ e 2₍₁₎ são também positivos, atingindo cerca de R\$ 6 e R\$ 10 bilhões, respectivamente. No entanto, para o cenário 3₍₁₎, os resultados são mais significativos. Neste cenário, a economia líquida alcançada para o ano de 2035 é da ordem de R\$ 12 bilhões.

A Tabela 4.5 apresenta os impactos econômicos acumulados para o ano de 2035. Para o cenário 3₍₁₎ a economia total nos custos de eletricidade corresponde a R\$ 115.874,00 milhões e o custo total no incremento da eficiência energética dos equipamentos em R\$ 7.830,00 milhões. O *VPL* para o mesmo cenário atinge o montante de R\$ 108.017,00. O *VPL* para os cenários 1₍₁₎ e 2₍₁₎ são igualmente satisfatórios.

Tabela 4.5. Impactos econômicos em nível nacional.

	Cenário 1 ₍₁₎	Cenário 2 ₍₁₎	Cenário 3 ₍₁₎
Economia Total dos Custos com Eletricidade (Milhões de R\$)	53.086,00	87.710,00	115.847
Custo Incremental Total do Equipamento (Milhões de R\$)	3.184,00	4.987,00	7.830
Valor Presente Líquido (Milhões de R\$)	49.901,00	82.723,00	108.017
Relação Custo/Benefício	16,7	17,6	14,8

Fonte: Elaboração própria.

O cenário 2₍₁₎ apresenta a melhor relação custo-benefício na implementação dos IMEE mais restritivos. Pode-se inferir que este resultado é obtido devido ao relativo baixo custo incremental dos equipamentos para este cenário. Apesar da relação custo-benefício, a

viabilidade econômica em nível nacional é melhor avaliada através do *VPL*. Neste caso o cenário 3_(I) apresenta o resultado mais promissor.

4.2 Análise das emissões de CO₂ pelo índice *TEWI*

O Brasil pertence ao Grupo 1 dos países A5 (ANEXO C) na Emenda de Kigali e tem prazo para o início do congelamento no consumo dos HFCs para o ano de 2024. Apesar do período estendido, como premissa assume-se que a partir de 2021 tem início a transição do fluido refrigerante R-410A para um alternativo de baixo *GWP* em todos os novos equipamentos.

Conforme citado, os impactos diretos são obtidos pelas emissões dos fluidos refrigerantes lançados na atmosfera devido aos vazamentos que ocorrem nos condicionadores de ar ao longo de sua vida útil e os impactos indiretos ocorrem pelas emissões na geração de energia elétrica para operar os equipamentos. Os impactos diretos e indiretos na transição dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP* são avaliados pelo índice *TEWI*.

Dentre as opções utilizadas nesta tese, o fluido refrigerante que apresentar o menor índice *TEWI* é a opção mais factível para substituir o atual R-410A. Após a escolha do novo fluido refrigerante de baixo *GWP*, as emissões diretas e indiretas no horizonte de 2021 até 2035 para todo o estoque nacional são avaliadas. A Figura 4.6 apresenta a projeção do estoque nacional para os condicionadores de ar no setor residencial brasileiro.

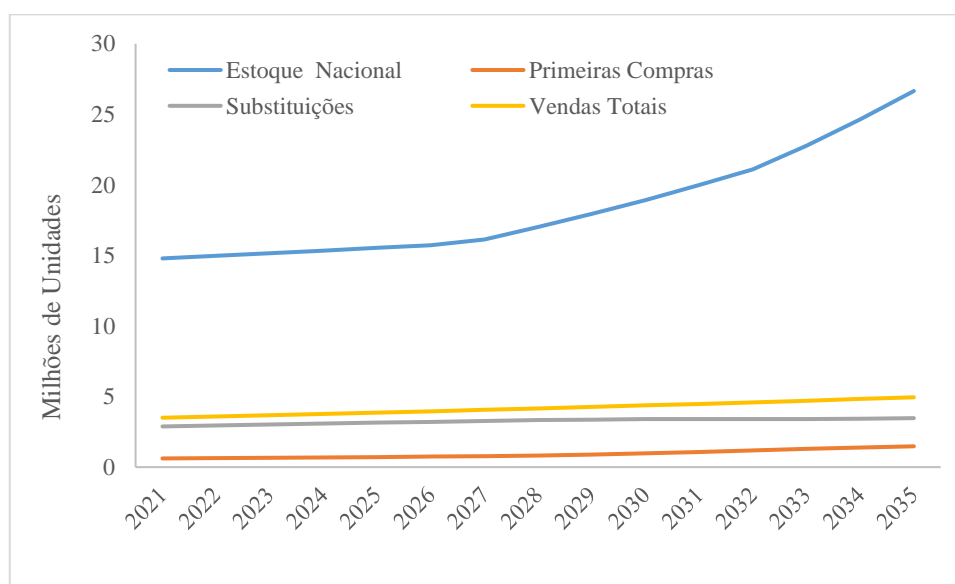


Figura 4.6. Evolução do estoque dos condicionadores de ar no Brasil.

O estoque nacional dos condicionadores de ar ocorre em função do número de residências e da difusão dos equipamentos a cada ano. As vendas totais correspondem à soma das primeiras compras e das substituições dos equipamentos obsoletos.

Considerando os dados apresentados na Tabela 3.7 e o estoque da Figura 4.6, o índice *TEWI* acumulado de 2021 a 2035 é contabilizado. Como premissa adota-se inicialmente o condicionador de ar de linha de base com fluido refrigerante R-410A, conforme já descrito em capítulos anteriores. A Tabela 4.6 apresenta as variações ocorridas pela transição do fluido refrigerante R-410A pelos fluidos refrigerantes alternativos de baixa *GWP* analisados. As alterações no consumo anual de energia e na carga do fluido refrigerante foram obtidas com o auxílio da Tabela 3.7.

Tabela 4.6. Variação do consumo unitário de energia e da carga de fluido refrigerante.

Fluido Refrigerante	Variação na Eficiência Energética (IDRS)	Variação na Carga de Refrigerante (Δm)	<i>UEC</i> (kWh/ano)	Carga de Fluido Refrigerante (kg)
R-410	-	-	1.767	0,758
ARM-71A	-1 %	-18 %	1.785	0,622
DR-55	+3 %	-13 %	1.714	0,659
R-32	+4 %	-24 %	1.697	0,576
L-41	-5 %	-16 %	1.855	0,636
HPR-2A	-2 %	-14 %	1.802	0,651

Fonte: Elaboração Própria.

Tomando como referência um único condicionador de ar, o índice *TEWI* para cada fluido refrigerante é utilizado para avaliar as emissões diretas e indiretas de CO₂, conforme apresenta a Figura 4.7.

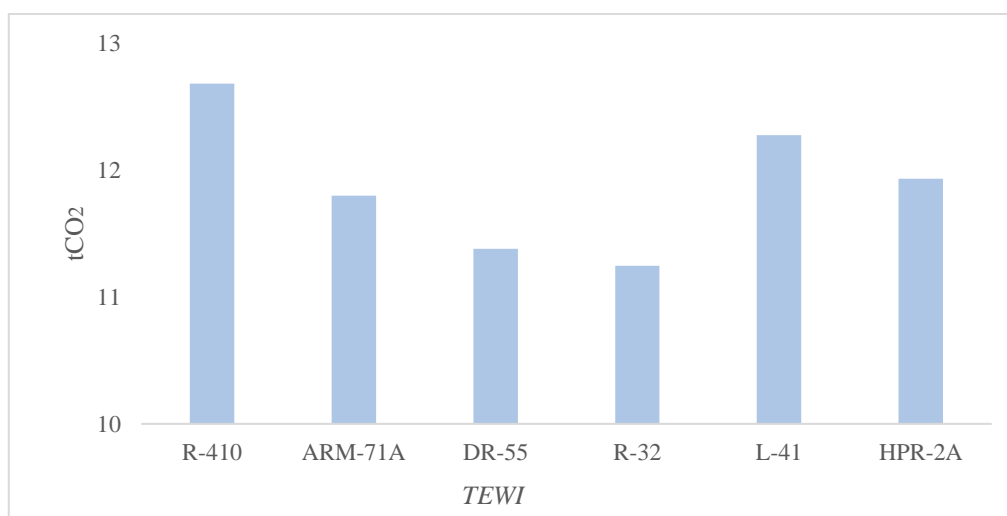


Figura 4.7. Índice *TEWI* para fluidos refrigerantes.

Para os fluidos refrigerantes avaliados, o R-32 apresenta o menor índice *TEWI*. A Tabela 4.7 segmenta as emissões diretas e indiretas para cada um dos fluidos refrigerantes.

Tabela 4.7. Análise de fluidos refrigerantes pelo índice *TEWI*.

Fluido Refrigerante	Emissões Diretas (tCO ₂)	Emissões Indiretas (tCO ₂)	<i>TEWI</i> (tCO ₂)
R-410	1,09	11,59	12,68
ARM-71A	0,09	11,71	11,80
DR-55	0,14	11,24	11,38
R-32	0,12	11,13	11,25
L-41	0,11	12,17	12,27
HPR-2A	0,12	11,82	11,93

Fonte: Elaboração própria.

Considerando um único equipamento, as emissões diretas apresentam pouca relevância quando comparadas às indiretas. Para o condicionador de ar com fluido refrigerante R-410A (equipamento de linha de base), as emissões diretas correspondem a 1,09 tCO₂ ao longo da sua vida útil, ao passo que as emissões indiretas a 11,59 tCO₂.

Para os fluidos refrigerantes alternativos avaliados, todas as emissões diretas são menores quando comparados ao equipamento de linha de base. Este comportamento pode ser explicado pelo fato destes fluidos apresentarem *GWP* inferiores ao R-410A e a carga reduzida de fluido refrigerante. O ARM-71A apresenta a menor emissão direta (0,09 tCO₂). No entanto, a análise deste único parâmetro não é suficiente para determinar se um fluido refrigerante é o mais adequado, em detrimento de outros. As emissões diretas para o ARM-71A são menores em relação ao R-410A, entretanto, a eficiência energética do equipamento diminui em 1% ocasionando um aumento nas emissões indiretas. A mesma tendência é observada para os fluidos refrigerantes L-41 e HPR-2A.

As emissões indiretas são menores apenas para os fluidos refrigerantes DR-55 e R-32. A substituição do R-410A para estes fluidos refrigerantes garante um aumento na eficiência energética do equipamento de 3% e 4%, respectivamente. No geral, todos os condicionadores de ar com fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP* apresentam índices *TEWI* inferiores ao do equipamento de linha de base. Entretanto, o melhor resultado foi encontrado para o fluido refrigerante R-32, com uma redução nas emissões de CO₂ de aproximadamente 12%.

A Emenda de Kigali reforçou o movimento em direção às aplicações que utilizam fluidos refrigerantes de baixo *GWP* e a inovação para tecnologias sustentáveis. A escolha do fluido refrigerante alternativo ocorre por uma combinação de eficiência energética, custos e desempenho ambiental. Os aspectos de segurança associados à toxicidade e flamabilidade são

fatores também avaliados na escolha do fluido refrigerante substituto (PEIXOTO, 2021). No contexto dos condicionadores de ar, o R-32 é o fluido refrigerante que vem apresentando grande aceitação para se tornar a próxima geração de fluidos refrigerantes.

Dentre os fluidos refrigerantes alternativos de baixo *GWP* avaliados pelo índice *TEWI*, o R-32 apresenta o menor impacto ambiental. O R-32 é uma nova classe de fluidos refrigerantes que vem apresentando grande interesse e aceitação pela indústria dos condicionadores de ar. Por ser um fluido refrigerante puro e eficiente, é utilizado em equipamentos de pequeno porte e também como misturas (*blends*) para a composição de outros fluidos refrigerantes (DAIKIN, 2015). Alguns fabricantes de condicionadores de ar já possuem equipamentos com o R-32 e possivelmente será a próxima geração de fluidos refrigerantes que substituirá o R-410A em condicionadores de ar de pequeno porte. As principais características do R-410A e do R-32 são apresentadas no ANEXO D.

4.2.1 *TEWI* Segundo o Estoque Nacional

Considerando o estoque nacional dos condicionadores de ar, a redução das emissões diretas e indiretas é estimada, assumindo que a partir de 2021 todos os novos equipamentos que entram no mercado utilizam o R-32 como fluido refrigerante. A determinação do índice *TEWI* tendo por base o estoque nacional dos condicionadores de ar instalados no Brasil é importante para estimar o grau de contribuição brasileira no aquecimento global devido ao uso destes equipamentos. Para fins comparativos, a análise é efetuada para os anos de 2021 até 2035. Neste período, os cálculos são realizados levando-se em consideração as entradas dos novos condicionadores de ar, segundo o modelo proposto pelas Equações 3.11 a 3.15. Assume-se que a partir do ano de 2021 os equipamentos fabricados já fazem uso do fluido refrigerante R-32. As emissões diretas e indiretas de CO₂, avaliadas em nível nacional para os equipamentos de linha de base com fluido R-410A e para o R-32 são mostradas na Figura 4.8.

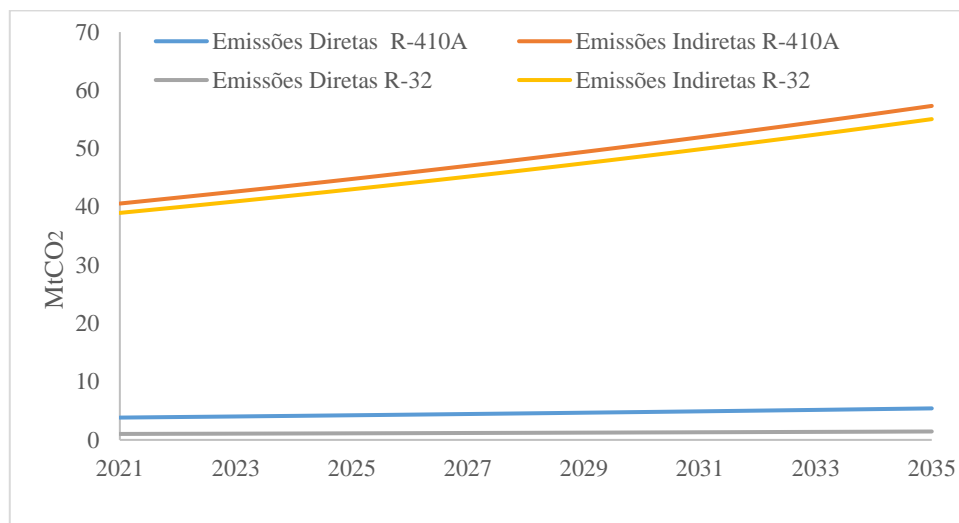


Figura 4.8. Emissões diretas e indiretas de CO₂.

As emissões diretas correspondem a uma pequena parcela quando comparada com as indiretas, entretanto, quando avaliadas para todo o estoque nacional, tornam-se significativas, atingindo até 2035 uma redução de 50MtCO₂. As emissões indiretas aumentam de maneira mais acentuada à medida que novos condicionadores de ar são inseridos no mercado. Considerando o ano de 2035, as emissões dos equipamentos com o fluido refrigerante R-410A atingem cerca de 57 MtCO₂, ao passo que estes mesmos equipamentos com fluido refrigerante R-32 emitem 55 MtCO₂. No agregado, as emissões anuais de CO₂, diretas e indiretas representam o índice *TEWI*, conforme mostra a Tabela 4.8.

Tabela 4.8. *TEWI* total em função dos condicionadores de ar vendidos.

Ano	Número de Equipamentos	<i>TEWI</i> R-410A (MtCO ₂)	<i>TEWI</i> R-32 (MtCO ₂)	Δ <i>TEWI</i> (MtCO ₂)
2021	3.501.294	44,40	39,98	4,42
2022	3.588.827	45,51	40,98	4,53
2023	3.678.548	46,65	42,01	4,64
2024	3.770.511	47,81	43,06	4,75
2025	3.864.774	49,01	44,13	4,88
2026	3.961.393	50,23	45,24	4,99
2027	4.060.428	51,49	46,37	5,12
2028	4.161.939	52,78	47,53	5,25
2029	4.265.987	54,10	48,72	5,38
2030	4.372.637	55,45	49,93	5,52
2031	4.481.953	56,83	51,18	5,65
2032	4.594.002	58,26	52,46	5,80
2033	4.708.852	59,71	53,77	5,94
2034	4.826.573	61,20	55,12	6,08
2035	4.947.237	62,73	56,50	6,23
Acumulado em 2035		796,22	717,06	79,16

Fonte: Elaboração própria.

Conforme as diferenças entre os valores apresentados acima, pode-se observar a importância de se considerar os efeitos dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP* nos novos condicionadores de ar. A redução acumulada para os anos em análise atinge aproximadamente 80 MtCO₂. O principal aspecto a observar na proposta de transição para os fluidos de baixo *GWP* é a questão ambiental. A substituição do fluido refrigerante R-410A pelo R-32 contribui para o atendimento das resoluções propostas pelos Protocolos de Montreal e Kyoto. No contexto da Emenda de Kigali, a antecipação dos prazos estabelecidos para o Brasil pode reduzir as emissões do R-410A na atmosfera, sendo um passo importante no esforço para minimizar o aquecimento global devido ao uso dos condicionadores de ar.

Dado que a produção de energia elétrica sempre resulta em impactos ambientais, a substituição dos condicionadores de ar com elevado consumo energético por equipamentos mais eficientes e que utilizam o R-32 como fluido refrigerante evita a construção de novas usinas hidrelétricas e termelétricas. Nas usinas hidrelétricas ocorrem transformações na natureza devido à formação de reservatório de água. Estas transformações fazem com que as comunidades deixem seu local de origem para viverem em outros lugares, começando a vida do zero. O mesmo se dá com os animais terrestres das regiões afetadas pelas hidrelétricas. O instinto de sobrevivência dos animais faz com que estes abandonem as regiões alagadas para habitar em outros lugares. Algumas espécies de peixes deixam de existir, uma vez que o ciclo predatório natural é interrompido, entre outros problemas.

No caso das usinas termelétricas, a energia gerada a partir da queima direta do carvão, óleo, gás natural ou outro combustível específico nas caldeiras produz dentre outros gases prejudiciais o CO₂. Na queima do carvão, por exemplo, CO e carbono puro são lançados à atmosfera, que contribuem para o agravamento do efeito estufa e prejudicam a qualidade do ar. Dentre todos os combustíveis usados nas termelétricas, o gás natural é o menos poluente. No entanto, o uso de gás natural só é possível para algumas situações específicas, uma vez que o Brasil depende da produção e importação de gás natural de outros países.

Diante do exposto, e tendo em vista que o fornecimento de energia no Brasil ocorre em grande parte por estas duas fontes, toda ação que minimize os impactos ambientais, tanto na eficiência energética quanto pelo uso de fluidos refrigerantes de baixo *GWP* são expedientes que contribuem positivamente para evitar a construção e a utilização de usinas a partir destas fontes de energia. Assim, os recursos naturais do nosso país são preservados e conseqüentemente, as emissões globais são minimizadas.

4.2.2 Mecanismos Adicionais de Eficiência Energética em Condicionadores de Ar

O aumento na demanda por condicionadores de ar implica em impactos sobre o SEB. Este crescimento futuro resulta na necessidade de investimentos em novas tecnologias para produção de energia elétrica para atender à demanda de energia, sob risco de transtornos como as crises energéticas ocorridas nos anos de 2000 e 2001 e mais recentemente no Amapá em 2020.

Ações que incentivam o aumento da eficiência energética no país, como as leis e os programas especiais para uso adequado e conservação de energia elétrica são mecanismos que podem ser considerados para reduzir o consumo de energia nos condicionadores de ar. Ações adicionais para conservação de energia são descritas a seguir.

A eficiência energética nos condicionadores de ar é representada pelo quociente da energia útil (no evaporador) e o consumo de energia elétrica (compressor e componentes eletro-eletrônicos). No ciclo termodinâmico, os principais parâmetros que apresentam oportunidades para o incremento da eficiência energética são a temperatura de evaporação, a temperatura de condensação, o superaquecimento e o sub-resfriamento.

O aumento na temperatura de evaporação no ciclo frigorífico resulta no aumento da eficiência energética. O aumento na temperatura de evaporação reduz o volume específico do fluido refrigerante e a perda de pressão na linha de sucção. Por outro lado, a redução na temperatura de condensação diminui o consumo de energia nos condicionadores de ar. O aumento no grau do sub-resfriamento do líquido antes de entrar no dispositivo de expansão aumenta a capacidade do condicionador de ar, sem aumentar a potência consumida. Os valores típicos para o sub-resfriamento variam entre 3 e 4°C e na prática, garante uma boa troca de calor no condensador.

O superaquecimento representa o aumento da temperatura do fluido refrigerante acima da temperatura de evaporação. Quanto menor o superaquecimento, menor o volume específico do fluido refrigerante na entrada do compressor. Consequentemente, maior será a vazão mássica deslocada, aumentando a capacidade do compressor. Entretanto, a faixa de superaquecimento varia entre 5 e 7 °C. Esta faixa garante que a carga de fluido refrigerante está adequada para aquele sistema e que todo fluido refrigerante será evaporado antes de entrar no compressor, maximizando o processo de evaporação e minimizando os danos ao compressor pelo golpe de aríete (ELETROBRÁS/PROCEL, 2005). A variação na pressão

de condensação em função das épocas do ano e a seleção adequada dos compressores são fatores que também interferem na redução do consumo de energia.

Em relação aos componentes, algumas oportunidades para melhoria da eficiência energética nos condicionadores de ar são: o correto isolamento das tubulações frigoríficas, a eliminação dos vazamentos dos fluidos refrigerantes, a redução da queda de pressão na linha de sucção, a redução na queda de pressão na linha de líquido e o uso de filtros secadores bem dimensionados e livres de umidade.

Uma etapa fundamental para a redução do consumo de energia nos condicionadores de ar consiste no correto dimensionamento do equipamento. O profissional qualificado deve realizar o cálculo de carga térmica do ambiente a ser condicionado. Os equipamentos subdimensionados são grandes consumidores de energia, posto que para atingir a temperatura de conforto desejada devem trabalhar por muito mais tempo. Por outro lado, o superdimensionamento dos condicionadores de ar, além dos gastos financeiros desnecessários faz com que o equipamento consuma mais energia, que poderia ser economizada ou utilizada para outras finalidades. Com o advento dos condicionadores de ar tipo *split inverter*, o correto dimensionamento dos equipamentos é uma fonte extra de economia de energia, visto que os equipamentos trabalham de acordo com a carga térmica do ambiente e quando bem dimensionados trabalham no ponto ótimo de operação, reduzindo o consumo de energia.

Após a análise cuidadosa do cálculo de carga térmica e do correto dimensionamento dos condicionadores de ar, a etapa de instalação é também uma etapa importante para a economia de energia. Os procedimentos sugeridos pelos fabricantes devem ser pontualmente seguidos, pois garantem a eficiência máxima do equipamento. Segundo o Programa Brasileiro de Eliminação dos HFCs (PBH, 2015), a instalação incorreta dos condicionadores de ar é responsável por reduzir a eficiência energética em aproximadamente 20%.

O emprego das boas práticas de instalação e manutenção, além de aumentar a vida útil do equipamento é uma forma oportuna para a efficientização energética nos condicionadores de ar. Para o desenvolvimento destas atividades, faz-se necessário a demanda por profissionais devidamente treinados e capacitados, de maneira a contribuir para a redução das emissões dos fluidos refrigerantes por meio de vazamentos (PBH, 2014).

No contexto da instalação dos condicionadores de ar, em algumas situações o comprimento mínimo das tubulações frigoríficas indicado pelos fabricantes é ultrapassado. Para estes casos, faz-se necessário o acréscimo de fluido refrigerante no sistema. Os

fabricantes estabelecem os parâmetros adequados para carga de fluido refrigerante adicional. As etiquetas dos equipamentos indicam a quantidade exata de fluido refrigerante necessário. A carga adicional de fluido refrigerante é de grande importância em relação a pressão de operação do equipamento. A baixa carga de fluido refrigerante prejudica a eficiência energética do condicionador de ar. Um outro cuidado especial em relação a carga de fluido refrigerante é o excesso, sob pena de risco de explosão e quebra de componentes (PBH, 2015). O ANEXO E apresenta um *check-list* com os corretos procedimentos que devem ser considerados durante a instalação dos condicionadores de ar, tendo por objetivo a eficiência máxima do equipamento.

A manutenção preventiva consiste em antecipar os possíveis defeitos que naturalmente ocorrem nos equipamentos em função do desgaste natural das peças e equipamentos. A correta manutenção contribui para a redução dos custos operacionais, aumento da vida útil do equipamento e promove uma melhoria na eficiência energética do sistema (PBH, 2015). A regularidade da manutenção varia em função do uso do equipamento, no entanto, recomenda-se que a cada seis meses deva ser executada, conforme os pontos apresentados no ANEXO F.

Medidas adicionais de economia de energia em condicionadores de ar também podem ser realizadas pelos usuários. Com advento da tecnologia *inverter*, toda fonte de calor evitada (no ambiente interno), significa economia de energia, visto que esse tipo de equipamento controla a velocidade do compressor (maior consumidor de energia) em função da carga térmica do ambiente. Portanto, deve-se evitar deixar os ambientes abertos, frestas, janelas entre outros. Para os casos onde ocorre muita insolação, o uso de películas reflexivas nas janelas de vidro e cores claras nas paredes e telhados promove a redução da transmissão de calor do ambiente externo para o interno. A substituição de lâmpadas incandescentes e fluorescentes por lâmpadas de *LED* é um mecanismo eficaz para minimizar a carga térmica do ambiente. As lâmpadas de *LED* são mais econômicas e dissipam menos calor no ambiente a ser climatizado. O uso de máquinas e equipamentos eficientes também reduz o consumo energético nos condicionadores de ar pela redução das cargas térmicas pelo uso destes equipamentos.

Uma maneira simples, no entanto eficaz para reduzir o consumo de energia consiste na regulação adequada da temperatura. Deve-se evitar o uso dos condicionadores de ar na temperatura mínima e manter o equipamento em uma temperatura que garanta o conforto térmico. As faixas de temperaturas entre 21°C a 23°C são adequadas para garantir os

objetivos supracitados. Grande parte dos condicionadores de ar modernos possuem a função *modo econômico*. Esta função, semelhante aos *smartphones*, reduz o consumo de energia. Para os condicionadores de ar que não possuem essa função, pode-se configurar o tempo de funcionamento do equipamento manualmente através da função *time* do equipamento ou por aplicativos específicos. Assim, por exemplo, o usuário pode desligar o equipamento na alta madrugada reduzindo o tempo de funcionamento do condicionador de ar entre 2 a 3 horas por dia.

4.3 Estudo de Caso II - Análise de Impactos IMEE + R-32

As vendas dos condicionadores de ar em muitas economias emergentes com alta população (incluindo o Brasil) estão crescendo a uma taxa de 10 a 15% ao ano. Estima-se que essa tendência, juntamente com o aumento na taxa de urbanização, eletrificação, na renda das famílias e a na queda dos preços dos condicionadores de ar promovam um impacto em larga escala na capacidade de geração de eletricidade (SHAH *et al.*, 2013). Mecanismos que reduzem o consumo de energia elétrica nos condicionadores de ar implicam em benefícios sob diferentes perspectivas. No entanto, observa-se que dentre as alternativas disponíveis, a introdução dos IMEE mais restritivos é o mecanismo que vem apresentando os melhores resultados na comunidade internacional. Adicionalmente, o uso R-32 como fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* em condicionadores de ar tipo *split* é uma grande contribuição para otimizar os resultados obtidos pelos IMEE mais restritivos.

Conforme discutido, a Portaria Interministerial N° 2 estabeleceu a alteração dos IMEE para 3,14 W/W em 2018 com revisão prevista a cada quatro anos. No entanto, nas simulações propostas nesta tese, estima-se que os IMEE para cada cenário é mantido constante durante o período de análise. A Tabela 4.9 apresenta a eficiência energética pelo IDRS, bem como a variação do *UEC* e do preço do equipamento para o Estudo de Caso II. Estas alterações ocorrem em função do incremento da eficiência do equipamento levando em consideração a participação do fluido refrigerante de baixo *GWP*.

Tabela 4.9. Dados de engenharia para o Estudo de Caso II (IMEE + R-32).

	IDRS (W/W)	Preço (R\$)	UEC (kWh/ano)
Linha de Base	3,14	1.210,00	1.767
Nível de Eficiência 1	5,20	1.473,00	1.067
Nível de Eficiência 2	5,72	1.518,00	951
Nível de Eficiência 3	6,24	1.544,00	857
Nível de Eficiência 4	6,76	1.657,00	785
Nível de Eficiência 5	7,28	1.941,00	736

Fonte: Elaboração própria.

A eficiência energética (IDRS), o preço dos equipamentos e o *UEC* foram estimados através de um “*curve fitting*” da Tabela 4.2. Assume-se que para os fabricantes, os custos na transição do fluido refrigerante R-410A para o R-32 não apresentam variações significativas, uma vez que há uma redução na carga do fluido a ser utilizado pelo equipamento. Os valores dos IDRS para a criação dos cenários no Estudo de Caso II encontram-se dentro das faixas de eficiência disponibilizadas pelo estudo realizado pelo *LBNL*. Assim, o incremento no preço dos equipamentos ocorre pelo aumento da eficiência energética em função das melhorias na engenharia e pela transição para o R-32, conforme apresenta a Figura 4.9.

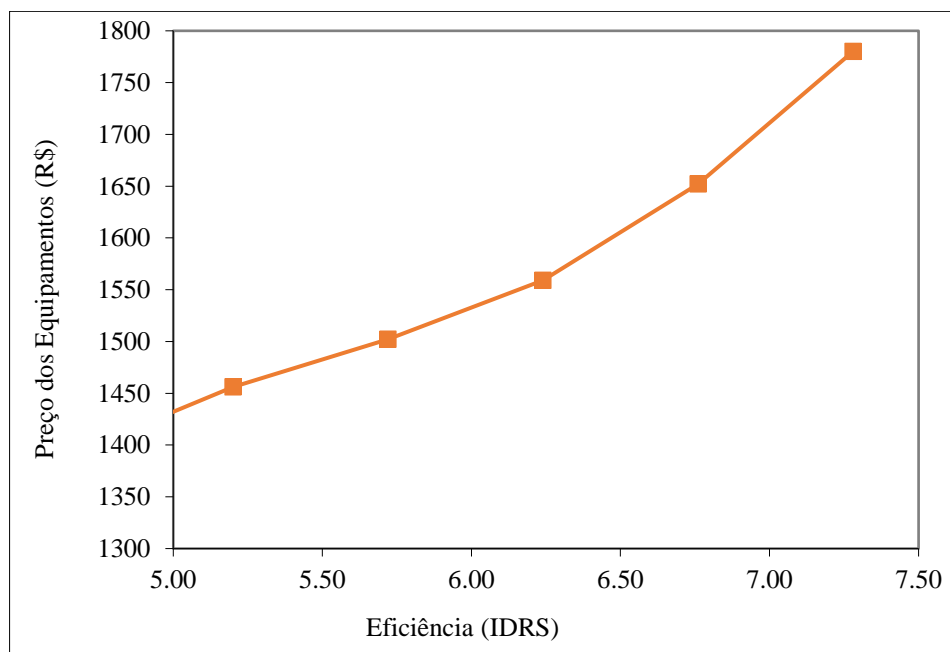


Figura 4.9. Preço do equipamento x eficiência energética para o Estudo de Caso II.

A Tabela 4.10 apresenta a participação de mercado para cada nível de eficiência energética no Estudo de Caso II. Cabe destacar que o equipamento de linha de base utiliza o fluido refrigerante R-410A. Para os cenários 1_(II), 2_(II) e 3_(II) são levadas em consideração as

variações da eficiência energética mais a participação referente à transição para o fluido refrigerante R-32.

Tabela 4.10. Parâmetros médios de mercado para o Estudo de Caso II (IMEE + R-32).

	Linha de Base	Cenário 1 _(II)	Cenário 2 _(II)	Cenário 3 _(II)
Linha de Base	28,16%	-	-	-
Nível de Eficiência 1	71,26%	99,43%	-	-
Nível de Eficiência 2	0,57%	0,57%	100%	-
Nível de Eficiência 3	0,00%	0,00%	100%	100%
Nível de Eficiência 4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Nível de Eficiência 5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eficiência Média (IDRS)	4,48	5,20	5,72	6,24
Preço Médio (R\$)	1.376,00	1.473,00	1.518,00	1.559,00
UEC Médio (kWh/ano)	1.295	1.066	951	857

Fonte: Elaboração própria.

Os impactos dos IMEE mais restritivos com adição do fluido refrigerante de baixo GWP (Estudo de Caso II) são avaliados a partir de 2021 finalizando em 2035. Considerando o PAMS descrito nos itens anteriores, o parâmetro fluido refrigerante R-32 é adicionado ao modelo, mediante o qual são inseridos os fatores que relacionam o aumento do desempenho energético em função do uso deste fluido refrigerante. Aplicando a metodologia proposta, em adição à contribuição dada no aumento da eficiência energética pela introdução do R-32, os impactos para os consumidores, fabricantes e impactos em nível nacional são avaliados.

4.3.1 Consumidores

O CCV para o Estudo de Caso II demonstra que com a introdução do fluido refrigerante R-32 são adquiridos benefícios adicionais para os consumidores. A Tabela 4.11 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4.11. Análise dos impactos para os consumidores.

Nível de Eficiência	IDRS (W/W)	Preço (R\$)	UEC (kWh/ano)	CCV (R\$)	Economia de CCV (R\$)	Payback (Anos)
Linha de Base	4,48	1.376,00	1.295	10.461,00	-	-
Cenário 1 _(II)	5,20	1.473,00	1.066	9.315,00	1.146,00	0,66
Cenário 2 _(II)	5,72	1.518,00	951	8.742,00	1.719,00	0,69
Cenário 3 _(II)	6,24	1.559,00	857	8.296,00	2.165,00	0,79

Fonte: Elaboração própria.

Para todos os cenários no Estudo de Caso II, uma redução no CCV foi observada, no entanto, o cenário 3_(II) apresenta o melhor resultado, uma vez que a economia no CCV para este cenário é de R\$ 2.165,00. Para os cenários 2_(II) e 3_(II) o valor da economia obtida permite ao consumidor adquirir um outro equipamento com a eficiência energética do cenário 3_(II).

O *payback* aumenta com o incremento da eficiência energética. No entanto, o retorno do investimento para os consumidores em todos os cenários é inferior a um ano. Atribui-se estes resultados à redução no consumo de energia e a consequente diminuição na conta de eletricidade, conforme mostra a Figura 4.10.

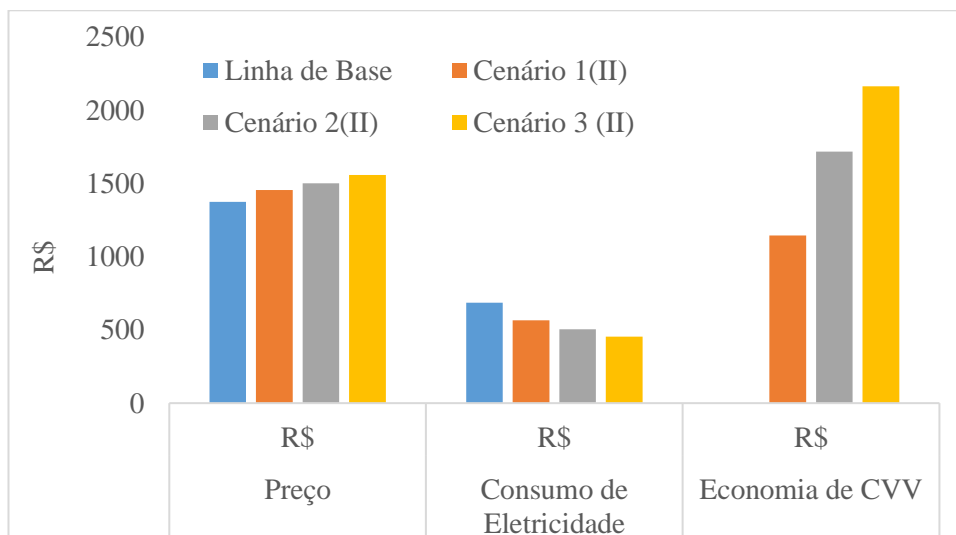


Figura 4.10. Impactos econômicos para os consumidores.

O aumento da eficiência energética eleva o preço de compra dos condicionadores de ar. Por outro lado, o incremento da eficiência energética promove uma redução nos custos anuais de eletricidade avaliados ao longo da vida útil do equipamento, proporcionando economia no *CCV* para um *payback* reduzido.

4.3.2 Fabricantes

Conforme discutido, a análise baseia-se em um modelo de fluxo de caixa e avalia como os IMEE, agora em conjunto com o fluido refrigerante R-32, impactam os fabricantes dos condicionadores de ar locais em termos de investimentos, custos de produção e receitas. Cabe salientar que nesta tese, assume-se que os custos na transição para os fluidos refrigerantes de baixo *GWP* estão incluídos na eficiência energética, dado que a carga de fluido refrigerante do R-32 é inferior à carga do R-410A, ou seja, não são considerados os custos adicionais na transição dos fluidos refrigerantes.

A Figura 4.11 apresenta os resultados do *FCL* para os fabricantes com a introdução dos IMEE mais restritivos e do fluido refrigerante R-32. Os investimentos para os fabricantes implicam em mudanças de curto prazo no fluxo de caixa nos anos anteriores à implementação dos equipamentos mais eficientes.

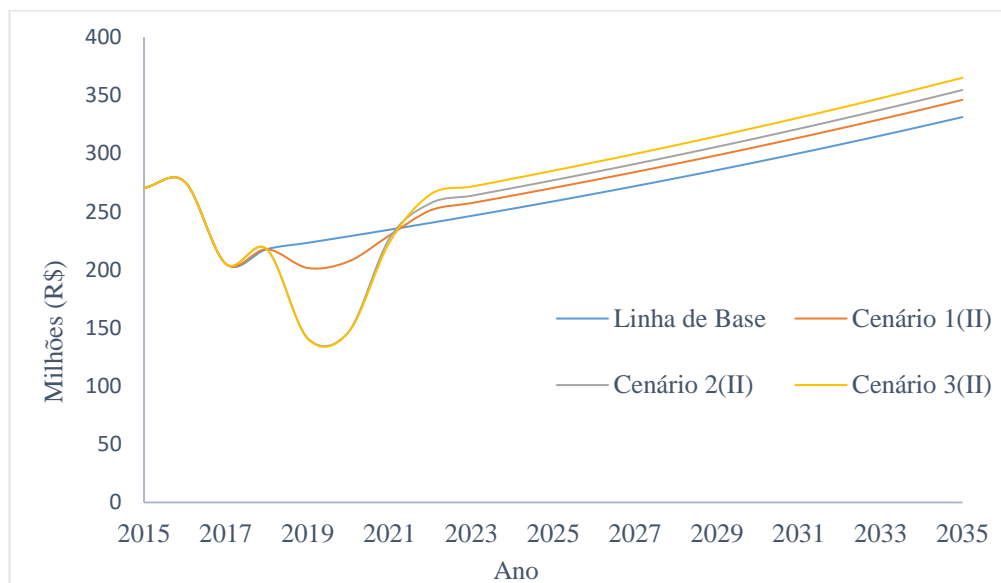


Figura 4.11. *FCL* com IMEE + R-32 entrando em vigor em 2021.

Os custos de conversão aumentam nos anos anteriores à implementação dos IMEE mais restritivos e na transição para o fluido refrigerante R-32 (2019-2021). Cabe destacar que estes custos são assumidos similares à transição somente para os IMEE mais restritivos. Os investimentos nos anos iniciais da implementação dos IMEE + R-32 promovem uma diminuição no *FCL* para os fabricantes. Uma vez que as receitas dependem das vendas dos equipamentos com os IMEE mais restritivos e fluido refrigerante de baixo *GWP*, nos anos posteriores a introdução dos novos equipamentos (2021-2035), as receitas aumentam em relação ao cenário de linha de base pelo preço mais elevado dos condicionadores de ar mais eficientes. Considerando o cenário 3_(II) o *FCL* atinge para o ano de 2035 aproximadamente R\$ 365 milhões.

As receitas aumentam à medida que os condicionadores de ar mais eficientes são introduzidos no mercado. O aumento das receitas para os fabricantes resulta em incrementos adicionais ao valor *VPLI*, conforme mostra a Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Viabilidade econômica para os fabricantes.

	Cenário 1 _(II)	Cenário 2 _(II)	Cenário 3 _(II)
(R\$ milhões)	42,3 > 0	- 25,1 < 0	33,4 > 0

Fonte: Elaboração própria.

No cenário 2_(II), o *VPLI* é negativo devido à alta participação (99,43%) dos condicionadores de ar que sofreram transformações na eficiência energética. Os altos investimentos na transição dos equipamentos para moderados níveis de eficiência não são recuperados no futuro pelos fabricantes. Nos cenários 1_(II) e 3_(II), entretanto, o *VPLI* para os fabricantes apresentaram resultados altamente positivos, validando que altos investimentos

para níveis moderados de eficiência energética não apresentam benefícios financeiros para os fabricantes.

4.3.3 Nacional

É importante destacar que o condicionador de ar de 12.000 *BTU/h* representa a maioria dos equipamentos no setor residencial e que em nível nacional configuram uma extensão dos impactos avaliados para os consumidores. A economia anual de energia é calculada pela diferença entre os cenários do Estudo de Caso II em relação ao cenário de linha de base. A projeção do consumo anual de energia é apresentada na Figura 4.12.

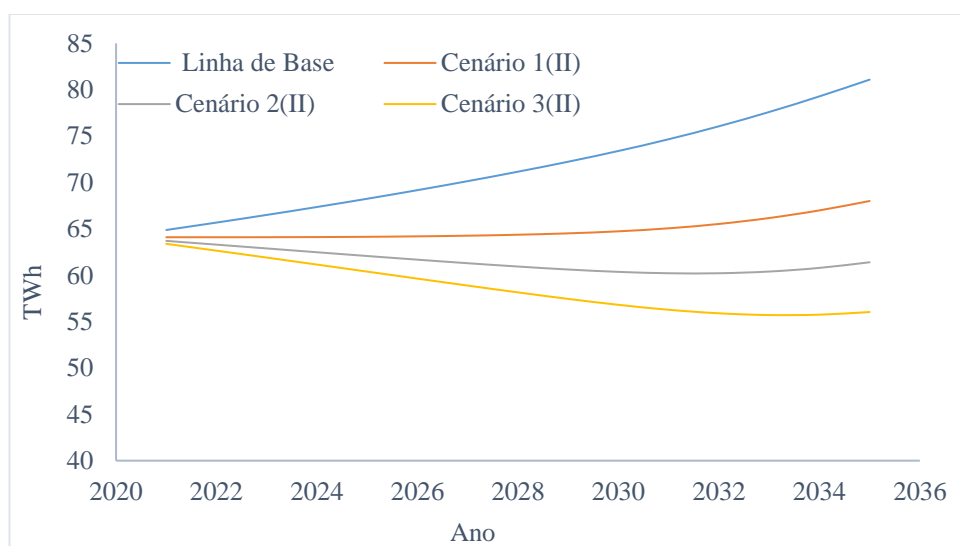


Figura 4.12. Consumo anual de energia elétrica.

O cenário de linha de base é usado como referência para análise do consumo anual de energia elétrica. Os incrementos na eficiência energética e a introdução do R-32 como fluido refrigerante implicam em uma redução no consumo de eletricidade pelos condicionadores de ar em nível nacional, conforme mostra a Figura 4.13.

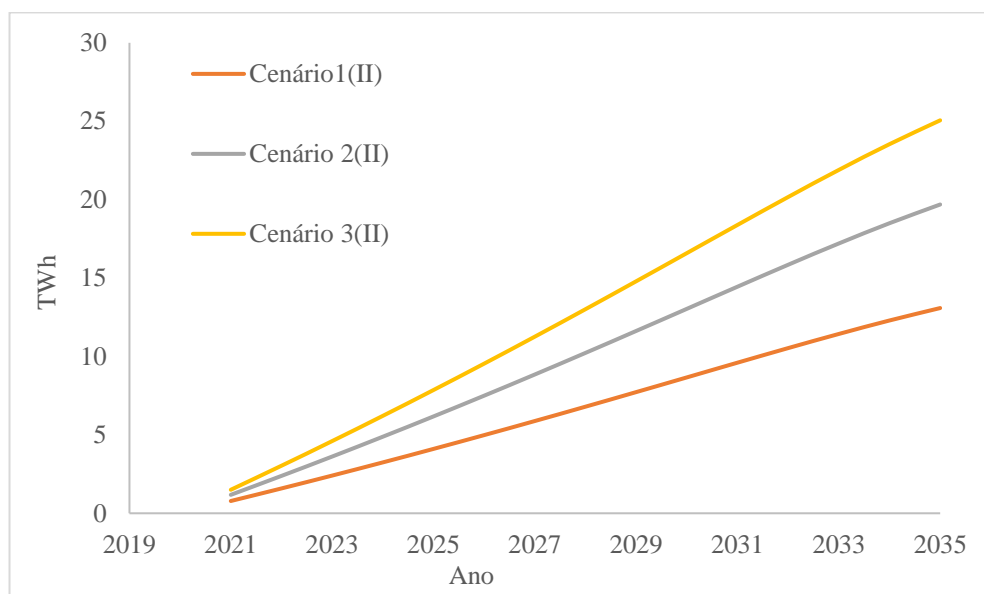


Figura 4.13. Economia anual de energia elétrica.

No Estudo de Caso II, equipamentos mais eficientes e dotados de fluido refrigerante R-32 são inseridos no mercado a partir de 2021. A economia de energia elétrica é estimada anualmente pela diferença entre o consumo dos equipamentos de linha de base e os equipamentos com IMEE mais restritivos e R-32.

O aumento na economia anual de energia elétrica é justificado pela introdução dos equipamentos mais eficientes no mercado e também pelo aumento da difusão. No cenário 3_(II), a economia de energia no ano de 2035 atinge 25,1 TWh. Para os cenários 1_(II) e 2_(II) as economias alcançam 13,1 e 19,7 TWh, respectivamente.

A economia acumulada de energia representa a soma total das economias adquiridas no período de 2021 a 2035. A Figura. 4.14 demonstra que o cenário 3_(II) apresenta o melhor resultado em nível nacional, atingindo 198 TWh de economia de energia até o ano de 2035.

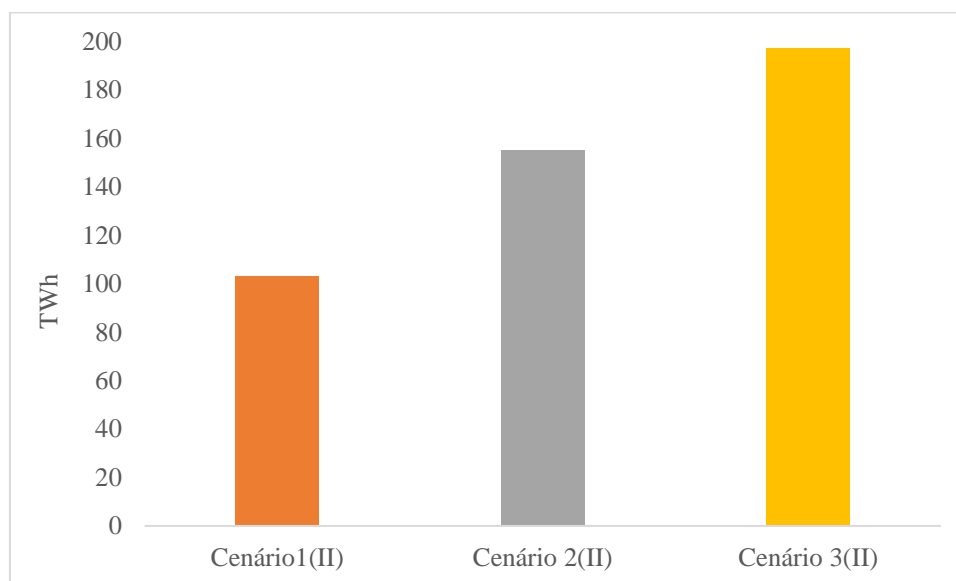


Figura 4.14. Economia de energia acumulada para o ano de 2035.

A infraestrutura para o fornecimento de energia elétrica conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) sofre em algumas horas do dia uma demanda instantânea de energia elétrica (carga de pico). Nestes períodos críticos de fornecimento, o uso dos condicionadores de ar tem um papel relevante, uma vez que são responsáveis por grande parte desta demanda, principalmente no período noturno. Neste contexto, a introdução de equipamentos mais eficientes (IMEE mais restritivos) em adição ao uso do fluido refrigerante de baixo *GWP* (R-32), além de contribuir para a conservação de energia, proporciona alívio na operação e protela investimentos futuros para atender a demanda da ponta do SIN.

A maior demanda por condicionadores de ar ocorre no período em que o consumo de energia elétrica já é intenso, necessitando assim de uma fonte de geração de energia mais cara, ineficiente e com maiores índices de poluição. A redução na demanda de pico de carga para os anos de 2025, 2030 e 2035, para o Estudo de Caso II é apresentada na Figura 4.15.

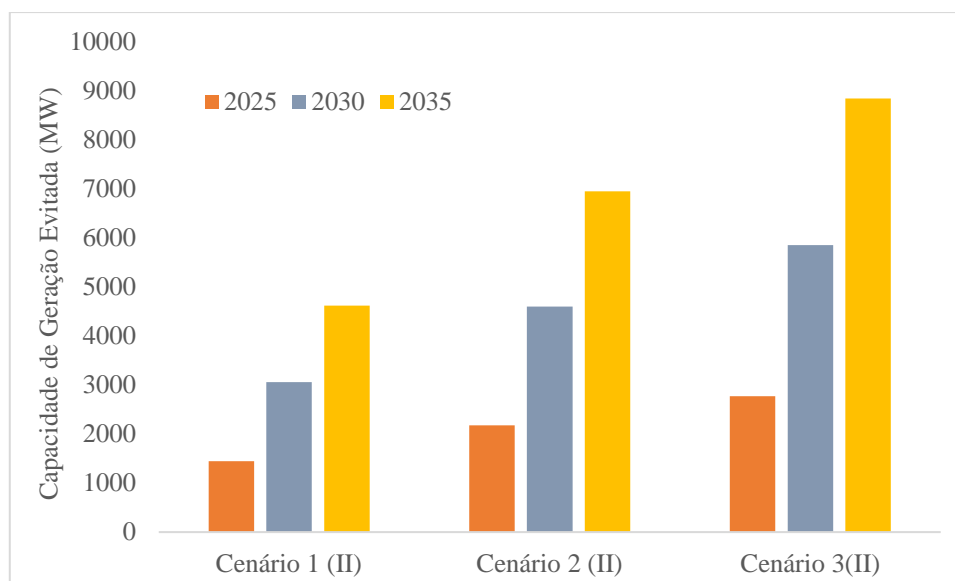


Figura 4.15. Redução na demanda de pico de carga.

Para o cenário 3_(II), a redução da demanda de pico para o ano de 2035 atinge aproximadamente 9.000 MW, o que corresponde aproximadamente à capacidade de geração da Usina Hidrelétrica de Tucuruí-PA. A eficiência energética reduz os impactos das emissões na produção de energia elétrica. Os impactos mais significativos em uma termelétrica ocorre na fase de operação, devido aos efeitos das emissões de GEE lançados na atmosfera em função da queima dos combustíveis fósseis. A redução no consumo dos condicionadores de ar implica em menores demandas por eletricidade. A Figura 4.16 apresenta a redução da economia de energia na fonte de geração para os condicionadores de ar com IMEE mais restritivos e R-32 como fluido refrigerante.

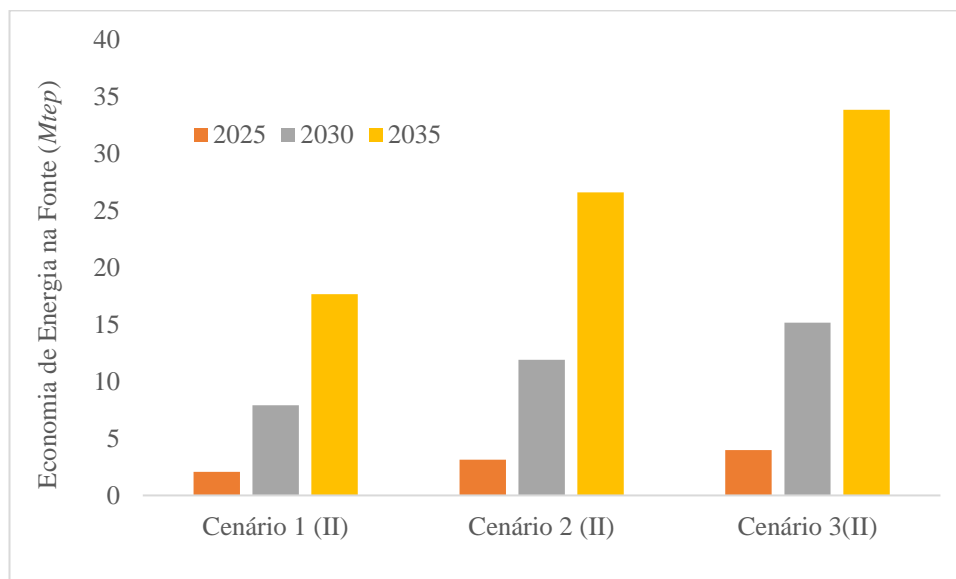


Figura 4.16. Economia de energia na fonte de geração.

A análise da economia de energia na fonte de geração demonstra que à medida que IMEE mais restritivos e a utilização do R-32 como fluido refrigerante são implementados, maior é a redução na queima de combustíveis fósseis. O cenário 3_(II) apresenta uma redução acumulada aproximada de 34 *Mtep* para o ano de 2035. Este valor representa uma redução na queima de aproximadamente 233 milhões de barris de petróleo.

A Figura 4.17 apresenta as mitigações indiretas acumuladas das emissões de CO₂ para os cenários do Estudo de Caso II.

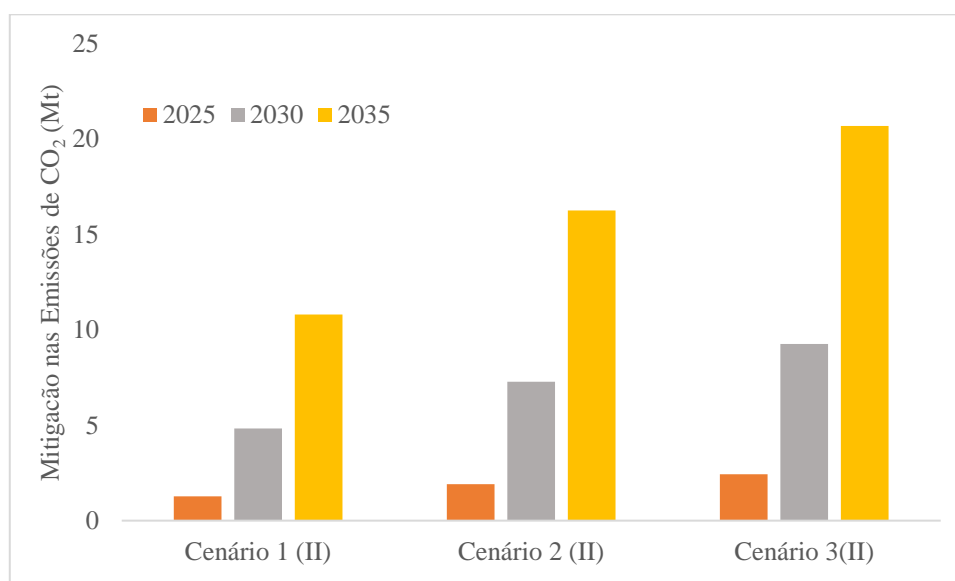


Figura 4.17. Redução acumulada das emissões de CO₂.

A redução das emissões de CO₂ foi estimada a partir da economia de energia para os condicionadores de ar mais eficientes, considerando o fator de geração de CO₂ e as perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica apresentados na Tabela 4.3. Os resultados,

com início da aplicação em 2021 indicam que para o estoque nacional as mitigações das emissões indiretas de CO₂ apresentam economias significativas em todos os cenários. No entanto, o máximo potencial observado foi no cenário 3_(II), atingindo a economia de 20,7 MtCO₂ até o ano de 2035.

A análise econômica do Estudo de Caso II para os condicionadores de ar no setor residencial, mostra-se mais favorável para o cenário 3_(II), conforme apresenta a Figura 4.18.

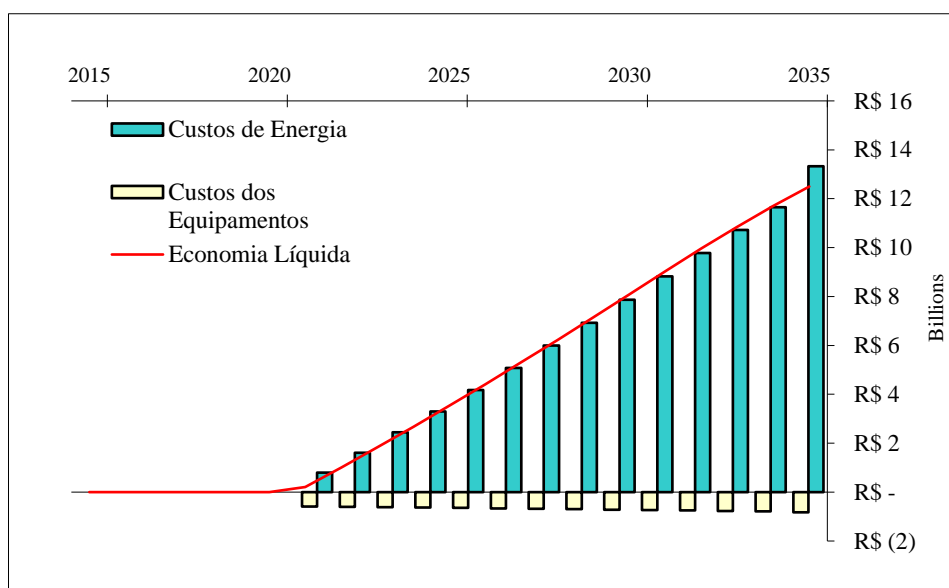


Figura 4.18. Economia de custos para o cenário 3_(II).

O *VPL* para os cenários 1_(II) e 2_(II) mostraram-se positivos. No entanto, para o cenário 3_(II), sob a perspectiva da sociedade, o *VPL* mostrou-se bem mais favorável. Os benefícios agregados com a economia de energia, considerando todo o estoque nacional são da ordem de R\$ 13 bilhões.

4.4 Análise Comparativa entre os Estudos de Caso I e II

A fim de avaliar a participação do fluido refrigerante R-32, nesta seção, uma análise comparativa entre os Estudos de Caso I e II é realizada. Demonstrou-se que para os condicionadores de ar no setor residencial, a introdução de IMEE mais restritivos resulta em benefícios para os consumidores e em nível nacional em todos os cenários propostos e que o R-32 intensifica estes benefícios. No entanto, o segundo cenário nos Estudos de Caso I e II apresentaram *VPLI* negativo. Este resultado demonstra que os fabricantes não obterão retorno dos investimentos realizados. Assim, dada a inviabilidade destes cenários, desenvolve-se a partir desta etapa uma análise comparativa entre os cenários 1 e 3, para os Estudos de Caso I e II.

Os dados de entrada para a análise dos IMEE mais restritivos são os mesmos, excetuando-se à contribuição referente ao aumento da eficiência energética na transição do fluido refrigerante R-32. Em relação as emissões diretas avaliadas pelo índice *TEWI*, a redução da carga do fluido refrigerante e o *GWP* são os parâmetros que sofreram alterações. No entanto, o impacto das emissões pela transição do fluido refrigerante R-32 foi contabilizado na seção 4.2. A Tabela 4.13 apresenta a participação de mercado para os Estudos de Caso I e II.

Tabela 4.13. Parâmetros de mercado para os Estudos de Caso I e II.

	Linha de Base	Cenário 1	Cenário 3
Linha de Base	28.16%	-	-
Nível de Eficiência 1	71.26%	99.43%	-
Nível de Eficiência 2	0.57%	0.57%	-
Nível de Eficiência 3	0.00%	0.00%	100.00%
Nível de Eficiência 4	0.00%	0.00%	0.00%
Nível de Eficiência 5	0.00%	0.00%	0.00%
Estudo de Caso I (IMEE)			
Eficiência Média (IDRS)	4,48	5,00	6,00
Preço Médio (R\$)	1.376,00	1.441,00	1.536,00
<i>UEC</i> Médio (kWh/ano)	1.295	1.111	892
Estudo de Caso II (IMEE + R-32)			
Eficiência Média (IDRS)	4,48	5,20	6,24
Preço Médio (R\$)	1.376,00	1.456,00	1.559,00
<i>UEC</i> Médio (kWh/ano)	1.295	1.066	857

Fonte: Elaboração própria.

A introdução dos IMEE mais restritivos e a transição do fluido refrigerante R-410A para o R-32 implica em um incremento na eficiência energética nos condicionador de ar. Conforme discutido, assume-se que a transição para o fluido refrigerante de baixo *GWP*, não promove custos adicionais para os fabricantes e consequentemente para os consumidores.

4.4.1 Consumidores

Sob a perspectiva dos consumidores, os principais parâmetros avaliados são o *CCV* e o *payback*. A Tabela 4.14 apresenta os resultados obtidos para os Estudos de Caso I e II.

Tabela 4.14. Impactos para os consumidores.

	Linha de Base	IMEE		IMEE + R-32	
		Cenário 1 _(I)	Cenário 3 _(II)	Cenário 1 _(II)	Cenário 3 _(II)
IDRS	4,48	5,00	6,00	5,20	6,24
Preço de compra (R\$)	1.376,00	1.441,00	1.536,00	1.456,00	1.559,00
UEC (kWh/ano)	1.295	1.111	892	1.066	857
Conta de Eletricidade (R\$)	689,00	589,00	473,00	565,00	454,00
CCV (R\$)	10.461,00	9.538,00	8.465,00	9.315,00	8.296,00
Eficiência (%)	-	17%	45%	21%	51%
Payback (Anos)	-	0,66	0,75	0,69	0,79
Vida Útil (Anos)	15	15	15	15	15
Economia de CCV (R\$)	-	923,00	1.997,00	1.146,00	2.165,00

Fonte: Elaboração própria.

A vida útil do equipamento se mantém constante para todo o conjunto de análise e a eficiência energética nos cenários do Estudo de Caso II é maior que o Estudo de Caso I em função da participação do fluido refrigerante de baixo *GWP*. A transição para o fluido refrigerante R-32, naturalmente promove um incremento adicional na eficiência energética do equipamento.

Os custos com manutenção e operação dos condicionadores de ar ao longo da vida útil (15 anos) são elevados quando comparados com o preço de compra dos equipamentos. No entanto, não foram consideradas alterações nestes custos em função do incremento da eficiência energética. Levando em consideração o *CCV*, o cenário 3_(II) apresenta o melhor resultado, atingindo o valor de R\$ 8.296,00. Quando comparado ao cenário 3_(I), cujo valor é de R\$ 8.465,00, observa-se uma redução de R\$ 170,00. Este decréscimo no *CCV* ocorre na transição para fluido refrigerante R-32. Para o cenário 3_(II), a economia do *CCV* atinge aproximadamente R\$ 2.200,00, valor mais que suficiente para aquisição de outro equipamento de mesma capacidade (R\$ 1.559,00). O *payback* manteve-se dentro da mesma ordem de grandeza em todos os cenários avaliados (inferior a um ano).

Um ponto importante a ser destacado é a variação da eficiência energética. Para os cenários 1_(II) e 3_(II), os incrementos da eficiência energética dada pela introdução do fluido refrigerante R-32 são de 4% e 6%, respectivamente. Estes resultados demonstram que a utilização do fluido refrigerante de baixo *GWP* é um recurso adicional para elevar ainda mais a eficiência energética nos condicionadores de ar tipo *split* para o setor residencial brasileiro.

4.4.2 Fabricantes

Os custos para os fabricantes associados às melhorias na eficiência energética são classificados em três categorias e conforme anteriormente comentado, assume-se que estes custos são constantes para os Estudos de Caso I e II, conforme apresenta a Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Despesas para os fabricantes.

Custos (Milhões R\$)	Estudo de Caso I e Estudo de Caso II
Conversão de Produtos	41,5
Conversão de Capital	126,9
Investimentos Requeridos	168,4

Fonte: Elaboração Própria.

Os investimentos realizados pelos fabricantes antes e durante o ano de implementação dos IMEE mais restritivos (2021) provocam uma redução nas receitas, principalmente nos anos iniciais nos quais a difusão dos novos condicionadores de ar é ainda pequena. A Tabela 4.16 apresenta as receitas, lucros e *FCL* para os fabricantes no ano de 2021. A variação do *VPLI* para os cenários propostos são também apresentados.

Tabela 4.16. Receitas para os fabricantes.

	Linha de Base	Estudo de Caso I (IMEE)		Estudo de Caso II (IMEE + R-32)	
		Cenário 1 _(I)	Cenário 3 _(I)	Cenário 1 _(II)	Cenário 3 _(II)
Milhões (R\$)	-				
Receitas em 2021	2.725	2.854	3.042	2.884	3.087
<i>LAJI</i> em 2021	263	274	288	278	292
<i>LOLAI</i> em 2021	241	251	263	254	268
<i>FCL</i> em 2021	234	230	225	229	223
Variação do <i>VPLI</i> de 2021 até 2035	-	26,7	9,7	59,8	33,4

Fonte: Elaboração Própria.

Em 2021, devido à pequena penetração dos equipamentos as receitas são baixas, entretanto, observa-se que a maior receita é alcançada no cenário 3_(II). Este valor ocorre em função da elevação do preço dos equipamentos mais eficientes. Os lucros operacionais antes de juros e impostos (*LAJI*), e os lucros operacionais líquidos após impostos (*LOLAI*) também ocorrem em função das receitas. Dado que as receitas para os fabricantes são maiores para os equipamentos mais eficientes, os lucros se elevam com o incremento da eficiência energética. O *FCL* para os fabricantes em 2021 apresenta um comportamento inverso às receitas. Posto que maiores investimentos são necessários para obter condicionadores de ar mais eficientes, os custos operacionais se elevam, reduzindo o *FCL* naquele ano.

A variação do *VPLI* em 2021 ocorre em relação ao cenário de linha de base. Verifica-se que para o cenário 1_(II) a maior variação no *VPLI* é obtida devido à baixa participação dos condicionadores de ar que sofreram alterações na eficiência energética e pela introdução do fluido refrigerante R-32 que incrementa a eficiência sem custos adicionais.

Apesar dos resultados financeiros obtidos para o ano de 2021 e da variação do *VPLI*, o principal parâmetro avaliado pelos fabricantes é o *FCL* acumulado durante os anos de 2021

a 2035. A análise dos impactos baseados no *FCL* avaliam como os IMEE mais restritivos e a introdução do fluido refrigerante R-32 afetam os fabricantes locais em termos de custos de produção e das receitas obtidas após a implementação das medidas de eficiência energética, conforme apresentado na Figura 4.19.

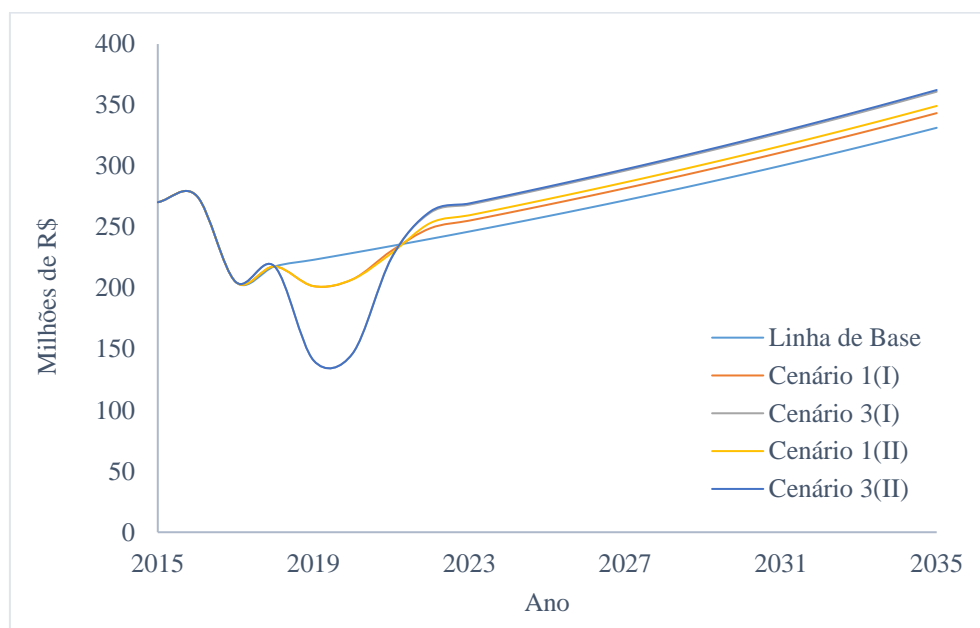


Figura 4.19. Evolução do *FCL*.

Para os fabricantes, os benefícios tornam-se altamente positivos à medida em que são implementados maiores incrementos na eficiência energética. Por outro lado, modestas melhorias na eficiência energética implicam em altos investimentos que os fabricantes não recuperarão no futuro.

É importante salientar que com o aumento da eficiência energética são observadas mudanças de curto prazo no *FCL* nos anos anteriores de implementação dos cenários avaliados. Estas variações tornam-se mais significativas à medida em que se aumenta a eficiência energética dos equipamentos pelos altos investimentos nos custos de conversão para adequar ao novo padrão. No entanto, à medida que as receitas, impulsionadas pelas vendas aumentam, um crescimento no *FCL* dos fabricantes devido à elevação dos preços dos condicionadores de ar mais eficientes é observado. O cenário 3_(II) apresenta o *FCL* mais promissor, valor correspondente a aproximadamente R\$ 363 milhões em 2035. Este resultado valida que para os fabricantes elevados IMEE são viáveis à médio e longo prazo. A introdução do fluido refrigerante R-32 promove um acréscimo de 3 milhões no *FCL* para os fabricantes.

4.4.3 Nacional

O provável padrão de eficiência energética a ser adotado é baseado nos cenários que apresentam os melhores benefícios globais. No contexto nacional, os benefícios para os consumidores são expandidos para todo o estoque e representam as vantagens pela implementação dos IMEE mais restritivos e pela introdução do fluido refrigerante R-32 nos condicionadores de ar tipo *split*.

O incremento dos IMEE e a introdução do R-32 como fluido refrigerante promovem uma redução no consumo de energia. A Figura 4.20 apresenta a evolução deste consumo para todo o estoque nacional.

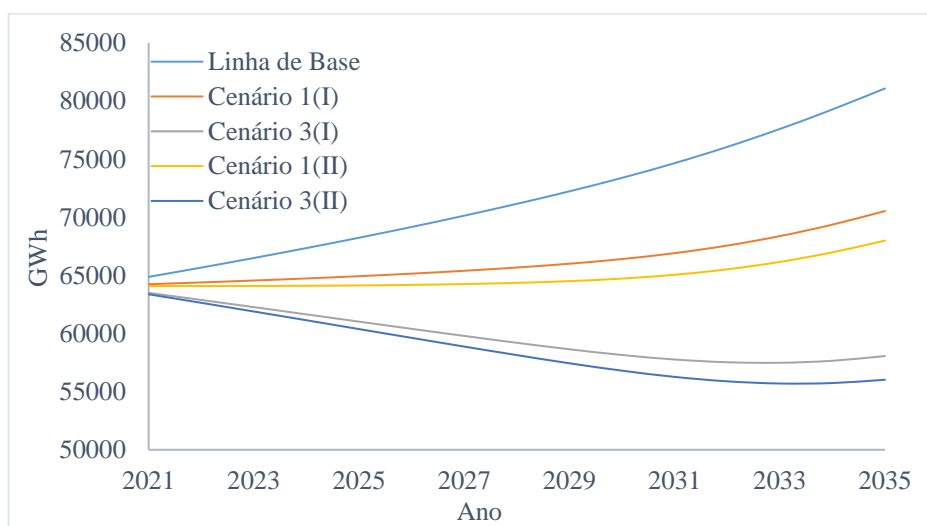


Figura 4.20. Consumo anual de energia elétrica.

Os IMEE mais restritivos e a utilização do fluido refrigerante R-32 afetam apenas os novos condicionadores de ar, não tendo efeito nos equipamentos já existentes. Por este motivo, nos anos iniciais a economia de energia é pequena, apresentando um crescimento gradual à medida que os novos equipamentos são inseridos no mercado. Observa-se também que a partir de 2031, o consumo de energia tende a apresentar um crescimento mais acentuado. Em grande medida, este crescimento ocorre pelo aumento da participação dos equipamentos no mercado. Para os casos analisados, a maior economia foi alcançada no cenário 3_(II). A Tabela 4.17 apresenta a redução do consumo de energia em nível nacional acumulados para os anos de 2025, 2030 e 2035.

Tabela 4.17. Economia de energia acumulada.

Energia (GWh)				
Ano	Cenário 1 _(I)	Cenário 3 _(I)	Cenário 1 _(II)	Cenário 3 _(II)
2025	9.766	21.311	12.117	23.200
2030	37.210	81.200	46.168	88.398
2035	83.111	181.364	103.118	197.441

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados preliminares mostram que as maiores economias de energia são apresentadas no cenário 3_(II), proporcionando uma redução acumulada de aproximadamente 198 TWh. Para o cenário 3_(I), a economia acumulada é em torno de 182 TWh. A transição para o fluido refrigerante R-32 proporciona uma economia de energia adicional de aproximadamente 16 TWh.

O incremento da eficiência energética reduz a demanda de pico de carga. A projeção para redução do pico de carga para os anos de 2021 até 2035 é apresentada na Figura 4.21.

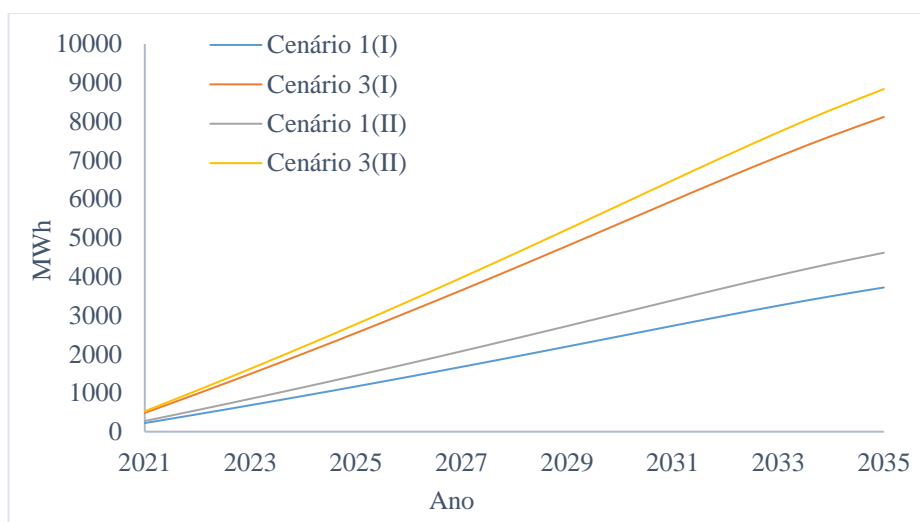


Figura 4.21. Capacidade de geração evitada.

Cabe salientar que o horário do pico de carga para o setor residencial diverge do comercial. Para o setor residencial, foco desta tese, o pico de demanda de energia elétrica devido ao uso dos condicionadores de ar ocorre às 24h:00min, que é o período no qual os consumidores fazem maior uso dos seus equipamentos. A maior economia no pico de carga foi obtida no cenário 3_(II), atingindo cerca de 9.000 MW para 2035, conforme apresenta a Tabela 4.18.

Tabela 4.98. Economia no pico de carga.

MW				
Ano	Cenário 1 _(I)	Cenário 3 _(I)	Cenário 1 _(II)	Cenário 3 _(II)
2025	1.166	2.545	1.447	2.771
2030	2.463	5.374	3.055	5.850
2035	3.720	8.117	4.615	8.837

Fonte: Elaboração Própria.

Considerando a economia acumulada para os anos de 2025, 2030 e 2035 no pico de carga, o cenário 3_(II) apresenta o resultado mais promissor em nível nacional. A utilização do fluido refrigerante R-32 proporciona uma economia de aproximadamente 6.000 MW, conforme apresenta a Tabela 4.19.

Tabela 4.19. Economia acumulada de pico de carga.

MW				
Ano	Cenário 1 _(I)	Cenário 3 _(I)	Cenário 1 _(II)	Cenário 3 _(II)
2025	3.443	7.515	4.272	8.181
2030	13.122	28.635	16.281	31.173
2035	29.309	63.958	36.364	69.628

Fonte: Elaboração própria.

À medida que a economia brasileira continua a crescer, projeta-se uma maior demanda destes equipamentos no mercado com o conseqüente aumento da poluição atmosférica. O impacto ambiental pelo uso dos condicionadores de ar tem se mostrado relevante nos últimos anos, tornando-se uma crescente preocupação com as emissões devido ao uso destes equipamentos, quando avaliados em nível nacional.

A Figura 4.22 apresenta a economia anual de energia na fonte de geração para os Estudos de Caso I e II. A redução prevista baseia-se na conversão da economia nacional estimada através do fator de emissão. As maiores economias são obtidas para os equipamentos mais eficientes.

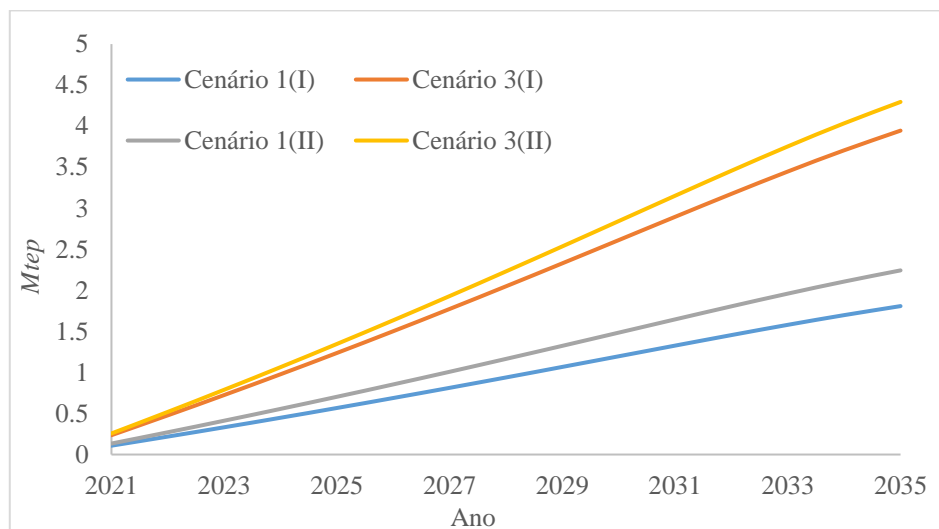


Figura 4.22. Economia de energia na fonte de geração.

O cenário 3_(II) apresenta o melhor resultado, proporcionando uma economia de aproximadamente 4,5 Mtep em 2035. A projeção anual da economia de energia acumulada na fonte de geração para os cenários do Estudo de Caso I e II é apresentada na Figura 4.23.

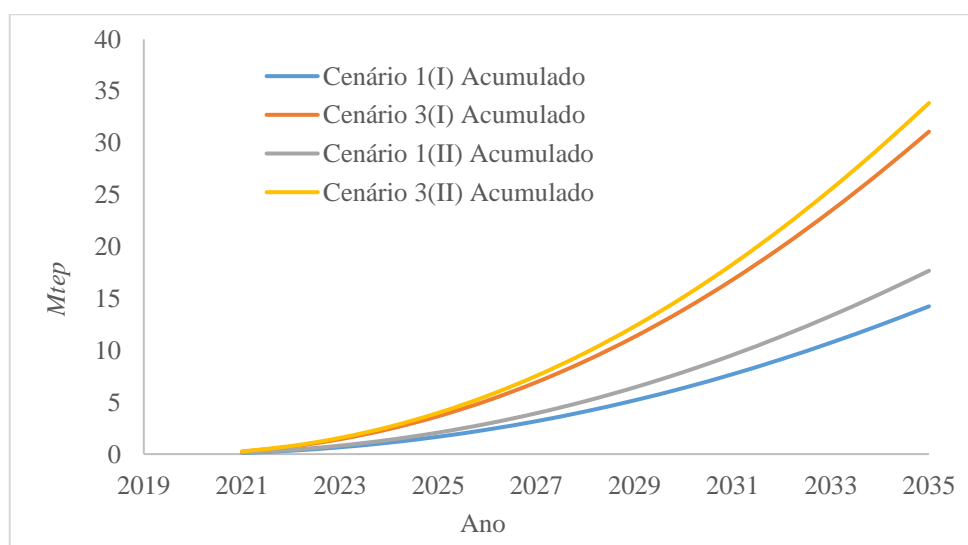


Figura 4.23. Economia de energia acumulada na fonte de geração.

Todos os cenários apresentam benefícios em nível nacional. No entanto, a maior redução é alcançada no cenário 3_(II), atingindo 33,8 Mtep, conforme apresenta a Tabela 4.20. A implementação do fluido refrigerante R-32 proporciona uma redução de aproximadamente 3 Mtep, equivalente a 20 milhões de barris de petróleo.

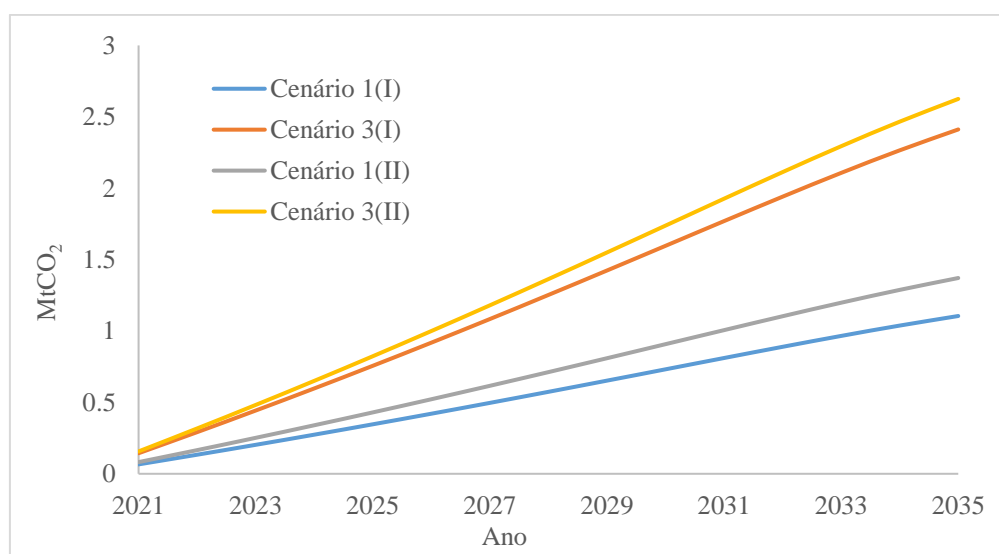
Tabela 4.20. Economia de energia na fonte de geração.

Ano	<i>Mtep</i>			
	Cenário 1 _(I)	Cenário 3 _(I)	Cenário 1 _(II)	Cenário 3 _(II)
2025	1,7	3,7	2,1	4,0
2030	6,4	13,9	7,9	15,2
2035	14,2	31,1	17,7	33,8

Fonte: Elaboração própria.

Além dos benefícios obtidos na redução da queima dos combustíveis fósseis pelos equipamentos mais eficientes, os IMEE mais restritivos e o uso do fluido refrigerante R-32 promovem benefícios ambientais secundários como por exemplo a redução da poluição das fontes aquáticas pela não-construção de novas usinas termelétricas.

Os resultados na redução das emissões indiretas de CO₂ na atmosfera são apresentados na Figura 4.24.

Figura 4.24. Redução nas emissões de CO₂.

A Figura acima demonstra que ao longo do tempo, as reduções nas emissões indiretas de CO₂ (promovidas pelo incremento da eficiência energética e pela transição do fluido refrigerante R-32) aumentam à medida que IMEE mais restritivos são implementados.

A Figura 4.25 apresenta a redução das emissões acumuladas de CO₂. De maneira similar às análises anteriores, as maiores economias em nível nacional são obtidas com os equipamentos mais eficientes para o cenário 3_(II).

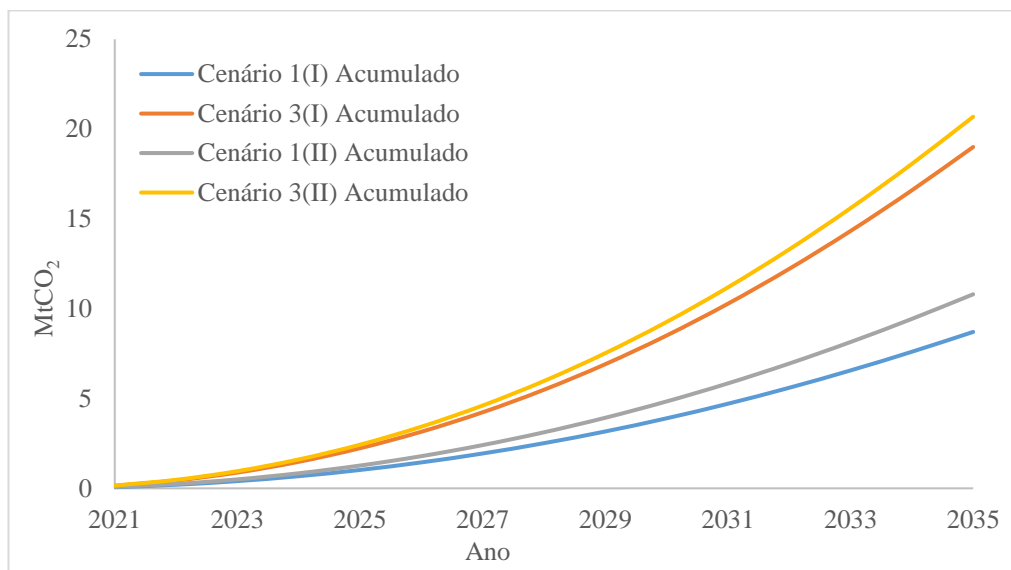


Figura 4.25. Redução das emissões acumuladas de CO₂.

A utilização do fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* (R-32) apresenta um impacto significativo nas emissões indiretas de CO₂. Considerando o cenário 3(II), a redução nas emissões de CO₂ atinge aproximadamente 2 Mt entre os Estudos de Caso I e II, conforme mostra a Tabela 4.21.

Tabela 4.21. Economia nas emissões de CO₂.

MtCO ₂				
Ano	Cenário 1(I)	Cenário 3(I)	Cenário 1(II)	Cenário 3(II)
2025	1,0	2,2	1,3	2,4
2030	3,9	8,5	4,8	9,3
2035	8,7	19	10,8	20,7

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados encontrados demonstram que quanto maior o desempenho energético dos condicionadores de ar, melhores são os benefícios em termos de impactos ambientais avaliados em nível nacional. De acordo com o índice *TEWI*, a parcela predominante na redução das emissões de CO₂ ocorre pelo efeito indireto (redução no consumo de energia elétrica). No entanto, as emissões diretas de CO₂, que ocorrem em função dos vazamentos, são fatores relevantes que também devem ser considerados. A Figura 4.26 apresenta as emissões diretas devido à transição do fluido refrigerante R-410A para o R-32 (fluido de baixo *GWP*) nos novos condicionadores de ar.

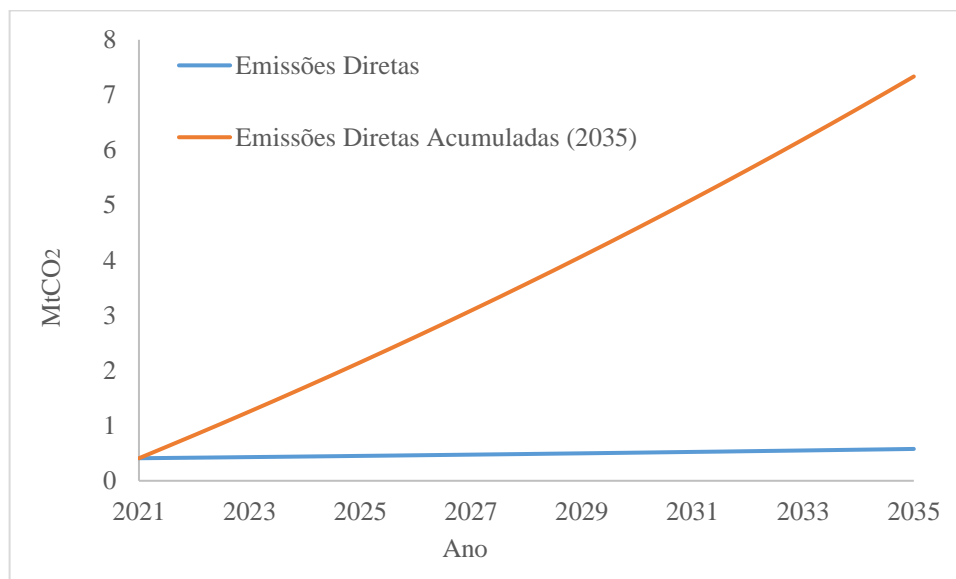


Figura 4.26. Impactos diretos pelo uso do R-32 para os novos equipamentos.

As emissões diretas pela transição do fluido refrigerante R-32 apresentam um potencial de redução nas emissões de CO₂ de aproximadamente 8 Mt, acumulados até o ano de 2035. Esta redução corresponde a aproximadamente 0,4% das emissões totais brasileiras no ano de 2020 (2,2 GtCO₂).

À medida que equipamentos mais eficientes são introduzidos no mercado, maior é a parcela devida às emissões indiretas, demonstrando que o incremento da eficiência energética é um mecanismo eficaz para a redução das emissões de CO₂ e que o uso dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP* é um fator de grande importância na contribuição para minimizar os efeitos do aquecimento global.

No que se refere aos benefícios financeiros em nível nacional, os preços dos condicionadores de ar para os Estudos de Caso I e II são considerados constantes durante todo o período de análise e foram estimados a partir dos estudos desenvolvidos pelo *LBNL*. Para Estudo de Caso II, adota-se as mesmas premissas, no entanto, para estimar os preços dos equipamentos um ajuste na ordem de 4% na eficiência energética em função da transição do fluido refrigerante R-410A para o R-32 foi realizado, conforme discutido. A Tabela 4.22 apresenta os custos totais com eletricidade, com equipamentos, *VPL* e a relação custo-benefício para os Estudos de Caso I e II.

Tabela 4.22. Benefícios financeiros para o ano de 2035.

Custos (milhões R\$)				
2035	Cenário 1 _(I)	Cenário 3 _(I)	Cenário 1 _(II)	Cenário 3 _(II)
Economia (Custos de Eletricidade)	53.083,00	115.847,00	65.865,00	126.116,00
Custo Incremental de Equipamentos	3.184,00	7.830,00	3.916,00	8.941,00
<i>VPL</i>	49.899,00	108.017,00	61.949,00	117.175,00
Custo/Benefício	16,7	14,8	16,8	14,1

Fonte: Elaboração Própria.

O cenário 3_(II) apresenta o máximo *VPL* dentre os estudos de caso analisados (R\$ 117.175,00 milhões). Para este cenário, os resultados apresentam uma economia nos custos com eletricidade de R\$ 126.116,00 milhões, que subtraídos dos custos totais com os incrementos da eficiência energética (R\$ 8.941,00 milhões) representa o *VPL* (R\$ 117.175 milhões). Quando confrontado com o cenário 3_(I), a economia financeira avaliada em nível nacional atinge R\$ 9.068,00 milhões. Esta economia ocorre pela introdução do fluido refrigerante R-32.

Levando em consideração a relação custo-benefício, o cenário 1_(I) apresenta o melhor resultado em nível nacional. No entanto, o principal parâmetro a ser avaliado é o *VPL*. De acordo com as análises desenvolvidas, verifica-se que, embora todos os cenários propostos apresentem *VPL* positivo, o cenário 3_(II) apresenta o resultado mais promissor, demonstrando que o incremento dos IMEE mais restritivos e o uso de fluidos refrigerantes de baixo *GWP* (R-32) são políticas que, bem implementadas apresentam um grande potencial para conservação de energia no país, bem como vantagens financeiras significativas.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto que a futura demanda por condicionadores de ar no setor residencial brasileiro apresenta uma forte tendência de crescimento, políticas que minimizem os impactos ambientais e apresentem o potencial de atrair benefícios financeiros para os consumidores, fabricantes e para a sociedade como um todo devem ser implementadas. Nesta tese, o modelo *PAMS* (sob chancela) *LBNL* foi aplicado para avaliar os impactos de diferentes IMEE em condicionadores de ar tipo *split* no setor residencial brasileiro. Adicionalmente aos IMEE, a transição do fluido refrigerante R-410A (alto *GWP*) para o R-32 (baixo *GWP*) foi inserida no modelo como mecanismo adicional de eficiência energética nestes equipamentos.

As estimativas resultantes da aplicação do modelo demonstraram que a implementação de condicionadores de ar tipo *split* com IMEE mais restritivos, bem como a introdução do fluido refrigerante de baixo *GWP* são mecanismos que apresentam elevado potencial de conservação de energia, resultando em benefícios para os consumidores, fabricantes e em nível nacional. Dentro do contexto da Emenda de Kigali, as vantagens associadas à utilização do fluido refrigerante R-32 (baixo *GWP*) são consolidadas.

Os impactos para os consumidores, fabricantes e em nível nacional foram avaliados em três etapas. A primeira, corresponde ao Estudo de Caso I, no qual são avaliados os impactos dos IMEE mais restritivos para três cenários. Na segunda etapa, através do índice *TEWI*, o fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP* (mais adequado para substituir o atual R-410A) e os impactos diretos e indiretos neste processo de transição para os novos equipamentos são avaliados. A terceira, corresponde ao Estudo de Caso II, no qual os IMEE mais restritivos em adição ao fluido refrigerante de baixo *GWP* escolhido (R-32) são avaliados.

5.1 Estudo de Caso I - IMEE mais Restritivos

Nesta etapa, três cenários foram avaliados considerando os IMEE mais restritivos em condicionadores de ar. Os benefícios para os consumidores foram positivos em todos os cenários propostos. No entanto, o maior benefício foi obtido no cenário 3_(D), que corresponde a um aumento na eficiência energética de aproximadamente 22%, em relação aos equipamentos com classificação A no atual PBE. O *CCV* é da ordem de R\$ 8.465,00, o qual representa uma redução de 24% em relação ao cenário de linha de base (R\$ 10.461,00). A redução no *CCV* atinge R\$ 1.997,00, valor suficiente para adquirir outro equipamento de

mesma capacidade e pagar os custos com eletricidade por aproximadamente um ano. O *payback* para o cenário 3₍₁₎ (IMEE), assim como para os demais cenários é inferior a um ano, demonstrando que sob a perspectiva dos consumidores, o incremento dos IMEE nos condicionadores de ar é viável economicamente. É importante salientar que para os cenários 1₍₁₎ e 2₍₁₎, os resultados também apresentaram benefícios para os consumidores nas condições usuais de mercado.

O incremento na eficiência energética evolui naturalmente em função da demanda de mercado e pelo surgimento das novas tecnologias. À medida que equipamentos mais eficientes são inseridos no mercado brasileiro haverá uma tendência na redução do preço dos equipamentos pela produção em escala. Desta forma, a longo prazo, os preços dos equipamentos possivelmente apresentarão uma redução.

O *VPLI*, sob a perspectiva dos fabricantes foram positivos somente para os cenários 1₍₁₎ e 3₍₁₎ atingindo cerca de R\$ 26,7 e R\$ 9,7 milhões, respectivamente. No cenário 2₍₁₎, o *VPLI* foi negativo, cujo valor é de R\$ 49,9 milhões. Para o cenário 1₍₁₎, os investimentos para o aumento na eficiência energética foram reduzidos, uma vez que somente 28,16% dos equipamentos sofreram alterações. Assim, o baixo investimento realizado pelos fabricantes foi o responsável pelo maior *VPLI* neste cenário. Cabe destacar que o cenário 3₍₁₎ também apresentou um *VPLI* positivo. Embora o preço dos equipamentos para este cenário seja superior ao cenário 1, o *VPLI* é menor devido à elevada participação dos equipamentos que sofreram mudanças na eficiência energética (100%).

Pode-se atribuir o valor negativo do *VPLI* para o cenário 2₍₁₎ pela elevada participação dos equipamentos que sofreram alterações na eficiência energética (99,43%), demonstrando que para os fabricantes, a introdução de moderados IMEE para elevadas participações faz com que os investimentos não sejam recuperados no futuro. Assim, estes investimentos são inviáveis economicamente para os fabricantes.

Para avaliar os impactos sob a perspectiva nacional, estimou-se a penetração dos condicionadores de ar no período de 2021 a 2035. A projeção do estoque, baseou-se em um modelo que leva em consideração a quantidade de equipamentos existentes, a projeção do número de vendas dos novos equipamentos e a substituição dos equipamentos antigos (ao final da sua vida útil). De acordo com o modelo de difusão dos condicionadores de ar para o setor residencial, a projeção do estoque foi de aproximadamente 15 milhões de unidades em 2021, alcançando no horizonte, cerca de 27 milhões de equipamentos em 2035.

Todos os cenários avaliados apresentaram benefícios em nível nacional, demonstrando a importância do incremento da eficiência energética nos condicionadores de ar. Equipamentos mais eficientes contribuem para redução no consumo de energia, nos impactos ambientais (emissões de GEE) e apresentam benefícios financeiros. Entretanto, o melhor resultado foi atingido no cenário 3₍₁₎. Considerando os resultados acumulados para o ano de 2035, tem-se que: (1) a economia de energia foi de 182 TWh; (2) a economia na fonte de geração de energia de 31 *MTep*; (3) a redução nas emissões de CO₂ de 19 Mt e; (4) a redução do pico de demanda (carga) de 8.1 GW.

Ainda no cenário 3₍₁₎, a ordem de grandeza das economias nacionais com os custos de eletricidade para o ano de 2035 foi de aproximadamente R\$ 115 bilhões e os custos no incremento de eficiência energética aproximaram-se de R\$ 8 bilhões, resultando em uma relação custo-benefício para este cenário de 14,8. Estes resultados demonstram que quanto maior o incremento na eficiência energética dos equipamentos, melhores são os benefícios avaliados em nível nacional.

5.2 Fluidos Refrigerantes de Baixo GWP

Os condicionadores de ar tipo *split* têm um papel relevante no contexto dos impactos ambientais, visto que contribuem de maneira direta e indireta para o aquecimento global. As emissões de CO₂ foram avaliadas pelo índice *TEWI*. O índice *TEWI* é um indicador confiável no que se refere a avaliação dos impactos ambientais devido ao uso dos fluidos refrigerantes. A busca por eficiência energética e a Emenda de Kigali, a qual estabelece a adoção de fluidos refrigerantes de baixo *GWP* levantou uma questão importante: teriam os condicionadores de ar com fluido refrigerante de baixo *GWP* o mesmo desempenho dos equipamentos com o atual fluido refrigerante?

A resposta à questão acima desencadeou a necessidade da avaliação dos impactos dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP* através do índice *TEWI*. Diversos fluidos refrigerantes estão em fase de implementação e testes para substituir o R-410A. Dentre os fluidos refrigerantes avaliados nesta tese, o R-32 apresenta o menor *GWP*. Ademais, sua composição química e a pressão de saturação são similares ao R-410A, facilitando sua implementação. Embora o R-32 seja levemente inflamável quando comparado ao R-410A, esta é uma desvantagem facilmente contornada com a implantação de boas práticas em instalação e manutenção. As vantagens associadas ao R-32 justificam a implementação deste fluido refrigerante como a melhor alternativa para substituir o R-410A em condicionadores de ar.

No Brasil, a Fabricante Daikin (seguindo o exemplo dos países desenvolvidos) já utiliza o R-32 como fluido refrigerante alternativo de baixo *GWP*. Com a aprovação da Emenda de Kigali, a tendência é que os demais fabricantes adotem o R-32 em seus equipamentos.

Como parte da estratégia para a contabilidade do índice *TEWI*, os principais fluidos refrigerantes com potencial para substituir o R-410A foram selecionados. A partir dos resultados obtidos verificou-se que o fluido refrigerante R-32 apresentou o menor índice *TEWI*, 11,25 tCO₂. As emissões diretas para o R-32, considerando apenas um único equipamento atinge 0,12 tCO₂ e as indiretas 11,13 tCO₂. A maior participação das emissões é de maneira indireta, o que demonstra a necessidade no aumento da eficiência energética nos condicionadores de ar.

É importante também destacar que a redução da carga do fluido refrigerante R-32 em relação ao R-410A é de -24% e que o incremento da eficiência energética na transição destes fluidos refrigerantes é de +4%. Considerando o estoque nacional até o ano de 2035, as emissões totais são significativas e apresentam um elevado potencial para minimizar o aquecimento global. A redução das emissões totais escalonadas pelas vendas dos novos condicionadores de ar avaliadas pelo índice *TEWI* são de 79,16 MtCO₂.

A partir do índice *TEWI*, demonstrou-se que a redução nas emissões de CO₂ por meio da substituição do fluido refrigerante R-410A pelo R-32 é significativa. Levando em consideração apenas a transição dos fluidos refrigerantes, demonstrou-se que a substituição dos equipamentos antigos (com R-410A) é um mecanismo importante na mitigação dos GEE.

5.3 Estudo de Caso II - IMEE mais Restritivos e Fluido Refrigerante de Baixo *GWP*

A introdução dos IMEE mais restritivos em adição ao uso do fluido refrigerante de baixo *GWP* (R-32) são mecanismos que quando aplicados em conjunto intensificam os benefícios obtidos para os consumidores, fabricantes e em nível nacional. De maneira similar ao cenário 2_(I) do Estudo de Caso I, no cenário 2_(II) os impactos para os fabricantes apresentaram *VPLI* negativo. Estes resultados indicam que em nenhum momento os fabricantes obterão retorno financeiro para este nível de eficiência energética. Por esse motivo, os cenários 1_(I) e 3_(I) do Estudo de Caso I foram confrontados com os cenários 1_(II) e 3_(II) do Estudo de Caso II no intuito de avaliar a participação referente ao uso do fluido refrigerante de baixo *GWP* (R-32) escolhido. A adição do fluido refrigerante R-32 promove

um incremento adicional na eficiência energética de 17% para 21% e de 45% para 51% para os cenários 1_(II) e 3_(II), respectivamente.

Para os consumidores, os cenários 1_(I) e 3_(I) apresentam uma redução no *CCV* de R\$ 923,00 e R\$ 1.997,00 em relação ao cenário de linha de base. Com a introdução do fluido refrigerante R-32 (IMEE + R-32), as economias alcançam R\$ 1.146,00 e R\$ 2.165,00, respectivamente, demonstrando que a transição para os fluidos refrigerantes de baixo *GWP* apresentam benefícios adicionais para os consumidores. O *payback* para os consumidores em todos os cenários propostos foi inferior a um ano.

Para os fabricantes, nos cenários 1_(I) e 1_(II) os *VPLI* são positivos devido às baixas participações dos equipamentos que sofreram alterações na eficiência energética. É importante destacar que não foram considerados os custos adicionais referentes à transição dos fluidos refrigerantes, uma vez que o R-32 apresenta características similares ao R-410A, não sendo necessário a inserção de novas tecnologias na linha de produção. Nos cenários 3_(I) e 3_(II), embora tenham participações elevadas na transição de eficiência energética (100%), os resultados do *VPLI* são positivos devido aos incrementos nos preços dos equipamentos que permitem recuperar os altos investimentos para estes níveis de eficiência energética.

As elevadas participações na transição de equipamentos que alteraram a eficiência energética implicam em altos custos. Assim, para moderados níveis de eficiência, o lucro das vendas dos equipamentos não supera o investimento realizado. Pode-se concluir que, para que os fabricantes tenham lucros com a implementação de equipamentos mais eficientes, deve-se optar por elevados IMEE para os casos de alta participação na transição de equipamentos e moderados IMEE para os casos de baixa participação.

Em nível nacional, quanto maior o incremento na eficiência energética, maiores são os benefícios. No cenário 3_(II), a economia de energia acumulada atinge para o ano de 2035 o valor de 198 TWh e uma redução do pico de carga de 8.4 GW. A contribuição do fluido refrigerante R-32 corresponde a 16 TWh na economia de energia e 0,72 GW no pico de carga.

Em termos das emissões de CO₂, o cenário 3_(II) apresenta uma redução de 21 MtCO₂ e uma economia na fonte de geração de 34 *Mtep*. A participação referente ao fluido refrigerante R-32 promove uma redução das emissões de 2 MtCO₂ e 2,7 *Mtep*, respectivamente.

Levando em consideração os custos totais com energia elétrica e os custos totais com equipamentos, o *VPL* avaliado em nível nacional para o cenário 3_(II) atinge uma economia

líquida de aproximadamente R\$ 13 bilhões. O cenário 3₍₁₎ alcança o *VPL* de R\$ 12 bilhões, sendo que a participação devida ao fluido refrigerante R-32 é da ordem de R\$ 1 bilhão.

5.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

Dos resultados obtidos pelo estudo dos impactos dos IMEE mais restritivos e dos fluidos refrigerantes de baixo *GWP* em condicionadores de ar para o setor residencial, pode-se listar as seguintes conclusões adicionais:

1. O aumento na eficiência energética dos condicionadores de ar no Brasil proporciona um crescimento nas vendas pela possibilidade de exportação para outros mercados em países com padrões de eficiência mais exigentes;
2. Considerando a perspectiva dos consumidores, o padrão mais provável é aquele que resulta em um menor *CCV*;
3. Considerando a perspectiva dos fabricantes, o padrão mais provável é aquele que promove os maiores retornos financeiros;
4. Considerando a perspectiva nacional, o padrão mais provável é aquele que apresenta a maior redução no consumo energia, nas emissões dos GEE e benefícios financeiros.
5. Equipamentos mais eficientes e dotados de compressores com velocidade variável, necessitam de métricas mais precisas para a contabilidade da eficiência energética.
6. Programas de treinamentos para a capacitação de técnicos e a conscientização do uso eficiente destes equipamentos para os usuários são mecanismos extras que apresentam um potencial significativo para reduzir o consumo de energia elétrica e as emissões de CO₂.

Durante o desenvolvimento desta tese foram identificadas algumas possibilidades de estudos que podem ser realizados no intuito de dar continuidade ao tema proposto:

1. A verificação dos impactos levando em consideração o desgaste natural dos componentes ao longo da vida útil do equipamento;
2. A avaliação dos impactos dos IMEE mais restritivos e com a introdução de fluido refrigerante de baixo *GWP* para os setores comercial e industrial;
3. A segmentação dos equipamentos por classe de eficiência energética (A, B, C e D);
4. A segmentação dos equipamentos levando em consideração os condicionadores de ar tipo janela;

5. A avaliação dos impactos levando em consideração a variação do preço dos equipamentos ao longo do tempo;
6. A avaliação dos impactos segmentados por nível regional: norte, nordeste, sul, sudeste e centro-oeste;
7. A verificação dos impactos dos IMEE em refrigeradores domésticos;
8. A verificação dos impactos dos IMEE em sistemas de refrigeração industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHYANKAR, N. SHAH, N.; PARK, W.Y.; PHADKE, A. **Accelerating Energy Efficiency Improvements in Room Air Conditioners in India: Potential, Cost-Benefits and Policies**. Energy Analysis and Environmental Impacts Division. April, 2017.

ABDELAZIZ, O., & SHRESTHA, S. **Soft-Optimized System Test of Alternative Lower GWP Refrigerants in 1.5-ton Mini-Split Air Conditioning Units**. Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute (AHRI) Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program (AREP). Test Report #62. January, 2016.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. Edição 01/2019.

ANTUNES, A. H. P.; SOUZA, L. M. P.; PANTO, V. H.; FILHO, E. P. B. **Efeito da Operação de Drop-in do Fluido Refrigerante R-22 por Fluidos Alternativos no Aquecimento Global pela Análise TEWI**. ASBRAV. 9º Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação - Mercofrio. Porto Alegre, 2014.

AIRAH - The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating. **Methods of Calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI)**. 2012.

BABILONI, A. M; ESBRI, J. N; MAKHNATCH, P. MOLÉS, F. **Refrigerant R-32 as Lower GWP Working Fluid in Residential Air Conditioning Systems in Europe and USA**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 80, December 2017, Pages 1031-1042.

BAJAY, S.; JANNUZZI, G. M.; HEIDEIER, R. B.; VILELA, I. A.; PACCOLA, J. A. GOMES, R. **Geração Distribuída e Eficiência Energética: Reflexões para o Setor Elétrico de Hoje e do Futuro**. 1ª Edição. Campinas, 2018.

BANCO CENTRAL. **Taxa de Juros Básicas - Histórico**. Histórico das taxas de juros fixadas pelo Copom e evolução da taxa Selic. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acessado em Maio de 2021.

CARDOSO, R. B. **Avaliação da Economia de Energia Atribuída ao Programa Selo Procel em Freezers e Refrigeradores**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2008.

CARDOSO, R. B. **Estudos dos Impactos Energéticos dos Programas Brasileiro de Etiquetagem Energética: Estudo de Caso em Refrigeradores de uma Porta, Condicionadores de Ar e Motores Elétricos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2012.

COSTA, R. R. F. **Avaliação do Programa Brasileiro de Etiquetagem e Níveis Mínimos de Eficiência Energética: Uma Avaliação Baseada em Teoria**. Tese de Doutorado. Instituto de Economia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

COSTA, F. N.; JANNUZZI, G.; LAMBERTS, R.; LESTSCHERT, V.; MELO, A. P.; CARVALHO, S.; GOES, R.; KISHINAMI, R.; ADABO, G. **Estudo de Impacto Regulatório: Diretrizes Gerais e Estudo de Caso para Condicionadores de Ar Tipo Split System no Brasil**. Projeto Kigali. Março de 2019.

CLASP - COLLABORATIVE LABELLING AND APPLIANCE STANDARDS. **Avaliação do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Ar Condicionado**. Projeto Kigali. Instituto Clima e Sociedade – iCS. Março de 2019.

DAIKIN. **Service Manual for Products Using R-32**. ESIE15-05. Service Manual. March, 2015.

DEPEC - DEPARTAMENTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS. **O Crescimento da Economia Brasileira 2018-2023**. Perspectiva DEPEC 2018. Abril, 2018.

DOU - DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Portaria N. 234, de 29 de Junho de 2020**. Publicado em 01/07/2020. Edição 124. Seção 1. Página 99.

DUARTE, J. A. **Condicionadores de Ar de Grande Porte: Chiller-fan Coil, Self Contained e Roof Top**. Centro de Produções Técnicas - CPT. Viçosa - MG, 2010.

EOA - ECOLOGIA & AÇÃO. **Ar Condicionado: Acordo sobre o Gás Pode Ajudar a Resfriar o Planeta**. Publicado em 25 de julho de 2016. Acessado em 31 de Junho de 2019.

ECONOLER; NAVIGANT; CEIS; ACEE. **Cooling Benchmarking Study**. In Partnership with The Collaborative Labeling and Appliance Standards Program (CLASP). 2011.

ELETROBRÁS. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005**. Classe Residencial Relatório Brasil. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil. Julho, 2007.

ELETROBRÁS. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos no Setor Residencial - Ano Base 2019**. PPH. Brasil. Relatório Técnico, 2019.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Rio de Janeiro, Eletrobrás, 2005.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Rio de Janeiro, 2016.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e Contribuições para o Avanço em Eficiência Energética**. Nota Técnica EPE 030/2018. Dezembro, 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Ano XVII, Número 147, Rio de Janeiro. Dezembro de 2019.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Ano XIV, Número 160. Rio de Janeiro. Janeiro de 2021.

ENCE - ETIQUETA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. **Selo Procel de Economia de Energia: Condicionadores de ar tipo *split***. Data da Atualização: 14/08/2018.

FRIDLEY, D.; ROSENQUIST, G.; LIN, J.; DINGGUO, X.; JIANHONG, C. **Technical and Economic Analysis of Energy Efficiency of Chinese Room Air Conditioners**. Energy Analysis Department. Environmental Energy Technologies Division. Lawrence Berkeley National Laboratory. University of California, 2001.

FISCHER, S. K.; HUGHES, P.J.; FAIRCHILD, P.D. **Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternatives Technologies**. Oak Ridge National Laboratory, December, 1991.

GALLAGHER, G. T.; ZHAN, Y. K.; HSU, P.; GUPTA, J.; PEDERSON, B.; CROES, D.R.; BLAKE, B.; BARLETTA, S.; MEINARDI, P.; ASHFORD, A.; VETTER S.; SABA, R.; SLIM, L.; PALANDRE, D.; CLODIC, P.; MATHIS, M.; WAGNER, J.. **High-Global Warming Potential F-gas Emissions in California: Comparison of Ambient-Based Versus Inventory-Based Emission Estimates, and Implications of Refined Estimates**. Environ Sci Technol. 2014 Jan 21; 48(2):1084-93. DOI: 10.1021/es403447v.

GELLER, H.; SCHAEFFER, R.; SKCLO, A.; TOLMASQUIM, M. **Policies for Advancing Energy Efficiency and Renewable Energy Use in Brazil**. Energy Policy, n.32, p.1437-1450, 2004.

GHISI, E.; PESSOA, J. L. N. **Estado da Arte em Eficiência Energética: Sistemas de Condicionamento de Ar**. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E. Florianópolis, fevereiro, 2015.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency**. OECD/IEA. Paris, 2014.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficiency Air Conditioning**. OECD/IEA. Paris, 2018.

JANNUZZI, G. D. M. & SWISHER J. N. P. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis**. Campinas - SP. Autores Associados, 1997.

JANNUZZI, G. D. M.; SWISHER, J.; REDLINGER, R. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos – Oferta, Demanda e suas Interfaces**. 2º Edição. IEI Brasil. 2018.

JANNUZZI, G. D. M. **A Conservação e Uso Eficiente de Energia no Brasil**. Revista Eletrônica Comciência. Campinas, n. 61. Dezembro de 2004. Disponível em: <http://www.comciencia.br/reportagens/2004/12/06>. Acessado em 28 de Junho de 2019.

LETSCHERT V. E.; BOJDA N.; KE J.; MCNEIL M. A. **Estimate of Cost-Effective Potential for Minimum Efficiency Performance Standards in 13 Major World Economies: Energy Savings, Environmental and Financial Impacts**. Environmental

Energy Technologies Division. Lawrence Berkeley National Laboratory - LBNL. July, 2012.

LETSCHERT V. E.; JANNUZZI G.; COSTA F.; LAMBERTS R.; BORGES K. **The Manufacturer Economics and National Benefits of Cooling Efficiency for Air Conditioners in Brazil**. ECEEE 2019 Summer Study Proceedings, 1536.

MAKHNATCH, P.; KHODABANDEH, R. **The Role of Environmental Metrics (GWP, TEWI, LCCP) in Selection of Low GWP Refrigerant**. The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE. Royal Institute of Technology, Sweden, 2014.

MARANGONI, F.; TELINI, T.; MORENO, R. P. R.; FERREIRA, S. O.; KONOPATZIK, E. A. **Comparativo Econômico entre Condicionadores de Ar com Tecnologias Convencional e Inverter**. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção. Fortaleza, CE, Brasil, 2015.

MAYKOT, R.; WEBER, G. C.; MACIEL, R. A.; **Using the TEWI Methodology to Evaluate Alternative Refrigeration Technologies**. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. School of Mechanical Engineering. Purdue University. 2004.

MANSO, C.A & BASTOS, F. S. **Caminhos para a Eficiência Energética do Ar Condicionado no Brasil**. Instituto Escolhas. 30 de Junho de 2020.

MCNEIL, M. A.; LETSCHERT, V. E.; BUSKIRK, R. D. V. **Methodology for the Policy Analysis Modeling System (PAMS)**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory - LBNL. Energy Technologies Department. 2007.

MCTIC, MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **Portaria Interministerial MDIC/MCTI, nº 8**. 22.01.2014.

MELO, C. A. **Padrões de Eficiência Energética para Equipamentos Elétricos de Uso Residencial**. 2009. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MITISIDI PROJETOS. **Kigali Project. Regulatory Impacts Analysis: Data Collection Phase**. Relatório Final. Setembro, 2018.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília, 2011.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia no Mundo - Indicadores de Matrizes Energéticas e Matrizes Elétricas 2013 - 2014**. Edição de Outubro de 2015.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Portaria Interministerial Nº 2/MME/MDIC/MCTIC**, de 14 de maio de 2018.

NASCIMENTO R. L. **Política de Eficiência Energética no Brasil**. Câmara dos Deputados. Consultoria Legislativa. Praça Três Poderes. Brasília - DF. Outubro, 2015.

PEIXOTO, R. A. **Uso de Fluidos Refrigerantes Hidrocarbonetos - Estado Atual e Tendências**. In: Uso de Fluidos Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado, 2007, São Paulo, Publicação em Anais, p. 63-77.

PEIXOTO, R. A. **Desafios e Tendências do Setor de Refrigeração Comercial**. UNEP, RTOC/TEAP. Associação Brasileira de Refrigeração Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento- ABRAVA. 2021.

PBH - PROGRAMA BRASILEIRO PARA ELIMINAÇÃO DOS HFCs. **Treinamento e Capacitação para Boas Práticas de Refrigeração de Supermercados**. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Brasília, 2014.

PBH - PROGRAMA BRASILEIRO PARA ELIMINAÇÃO DOS HFCs. **Treinamento e Capacitação para Boas Práticas em Sistemas de Ar Condicionado Tipo Split**. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Brasília, 2015.

PEREIRA, R. A. **Uma Nova Metodologia para o Cálculo do Impacto das Aplicações de Refrigeração Residencial sobre o Aquecimento Global**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

PEREIRA, C. D.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. **Nota Técnica Referente aos Níveis Mínimos de Eficiência Energética de Condicionadores de Ar no Brasil**. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E. Florianópolis, julho, 2013.

PROJETO KIGALI. **Avaliação do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Ar Condicionado**. Instituto Clima e Sociedade - (iCS). Março, 2019.

RUPP, R. F; LAMBERTS, R. **Relatório: Fatores de Conversão de Energia Elétrica e Térmica em Energia Primária e em Emissões de Dióxido de Carbono a Serem Usados na Etiquetagem de Nível de Eficiência Energética de Edificações**. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E. Florianópolis, Abril de 2017.

SANTOS, E. J. **Caracterização de Ruído de Sistema de Ar Condicionado Unitário Tipo “Mini-Split” em Residências Unifamiliares**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2017.

SHAH, N., P. WAIDE AND A. PHADKE **Cooling the Planet: Opportunities for Deployment of Superefficient Room Air Conditioners**. Lawrence Berkeley National Laboratory and Navigant Consulting, Inc., 2013.

SHAH, N.; WEI, M.; LETSCHERT, V.; PHADKE, A. **Benefits of Leapfrogging to Superefficiency and Low Global Warming Potential Refrigerants in Room Air Conditioning**. Energy Technologies Area. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 2015.

SHAH, N.; KHANNA, N.; KARALIN.; PARK, W. Y.; QU, Y.; ZHOU, N. **Opportunities for Simultaneous Efficiency Improvement and Refrigerant Transition in Air**

Conditioning. Energy Analysis and Environmental Impacts Division. Lawrence Berkeley National Laboratory. July, 2017.

TAYLOR, M.; SPURLOCK, C. A.; YANG, H.C. 2015. **Confronting Regulatory Cost and Quality Expectations: An Exploration of Technical Change in Minimum Efficiency Performance Standards.** Discussion paper. Washington, DC: Resources for the Future.

USDOE, U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Final Rule Technical Support Document: Energy Efficiency Programs for Consumers Products: Residential Central air Conditioners and Heat Pumps.** 2016.

VENDRÚSCULO, E. A.; QUEIROZ, G. C.; JANNUZZI, G. D.; JÚNIOR, H. X. S.; POMÍLIO, J. A. **Life-Cycle Cost Analysis of Energy Efficiency Design Options for Refrigerators in Brazil.** Energy Efficiency. Springer Science. December, 2008.

VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial.** Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFICIENCIA. ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, 2005.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações.** 1ª Edição. Elektro. Universidade Federal de Itajubá. EXCEN, FUPAI. Campinas - SP, 2012.

WIEL, S. & MCMAHON, J. E. **Energy Efficiency Labels and Standards. A Guide Book for Appliances, Equipment, and Lighting.** 2nd Edition. Washington D.C. USA, 2005.

XU, Y.; ZAELEKE, D.; VELDERS, G. J. M.; RAMANATHAN, V. **The Role of HFCs in Mitigation 21st Century Climate Change.** Atmospheric Chemistry and Physics. June, 2013.

ANEXO A – Bins de Temperatura e Condições de Ensaio

Distribuição dos bins de temperatura externa																			
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Total

°C	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	-
h	130	167	231	271	253	226	189	149	128	111	84	60	38	22	12	5	3	1	2080

Condições de ensaio	Ensaio 1 (carga total, a 35° C)	Ensaio 2 (carga parcial, a 35° C)	Ensaio 3 (carga parcial, a 29° C)
Aplicação	Obrigatório	Obrigatório	Opcional
Capacidade de refrigeração	100% do valor nominal	50% do valor nominal	50% do valor nominal
Temperatura <i>outdoor</i>	TBS: 35,0°C TBU: 24,0°C	TBS: 35,0°C TBU: 24,0°C	TBS: 29,0°C TBU: 19,0°C
Temperatura indoor	TBS: 27,0°C TBU: 19,0°C	TBS: 27,0°C TBU: 19,0°C	TBS: 27,0°C TBU: 19,0°C
Tolerâncias	A capacidade de refrigeração medida deve ser de pelo menos 92% do valor nominal.	A capacidade de refrigeração medida em carga parcial pode variar de 45 a 55% da capacidade em carga nominal, conforme a tolerância definida na norma técnica ISO 16358-1.	A capacidade de refrigeração medida em carga parcial pode variar de 45 a 55% da capacidade em carga nominal, conforme a tolerância definida na norma técnica ISO 16358-1.

ANEXO B - O Brasil e o Protocolo de Montreal e Kyoto

Notas baseadas em: <http://www.protocolodemontreal.org.br>

O Protocolo de Montreal surgiu a partir da Convenção de Viena para Proteção da Camada de Ozônio, realizada em 1985, na Áustria. O texto principal estabelecia uma série de princípios relacionados à comunidade internacional, cujo objetivo principal era promover mecanismos de proteção à camada de ozônio. O Protocolo de Montreal sobre as Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (ODP) entrou em vigência em 1º de janeiro de 1987. Atualmente 197 Estados Partes aderiram ao Programa, dentre estes países inclui-se o Brasil. No texto são estabelecidos obrigações específicas, quanto à produção e ao consumo das Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (SDOs). O Protocolo de Montreal estabeleceu metas para a eliminação das SDOs para os países membros. No entanto, foram respeitadas os princípios das responsabilidades comuns. Dessa maneira, no ano de 1990 foi instituído o Fundo Multilateral para a Implementação do Protocolo de Montreal (FML). Este recurso provê assistência técnica e financeira para os países em desenvolvimento, incluindo o Brasil.

O Brasil aderiu ao Protocolo de Montreal através do Decreto nº 99.280, de 06 de junho de 1990 e no dia 1º de janeiro de 2010, o Brasil anunciou o fim da produção, comercialização e importação dos CFCs. As estratégias utilizadas para alcançar estes resultados são descritas a seguir:

1. Planejamento através de um programa factível com a realidade brasileira;
2. Os fabricantes de aerossóis foram obrigados a informar aos consumidores os produtos que não utilizam CFCs;
3. Os fabricantes de refrigeradores e condicionadores de ar foram impedidos de usar CFCs no seu ciclo de produção;
4. Veto das importações de CFCs;
5. Aprovação do Plano Nacional de Eliminação de CFCs, no qual o Governo conseguiu um aporte financeiro de US\$ 26,7 milhões para atingir os objetivos propostos;
6. Outras iniciativas bem sucedidas foram: (a) a instalação de centrais de regeneração e de unidades descentralizadas de reciclagem; (b) distribuição dos equipamentos para recolhimento dos CFCs; (c) capacitação de técnicos para garantir as boas práticas no setor de serviços. O autor desta tese participou ativamente na capacitação de técnicos,

ministrando treinamentos e prestando consultoria referente às boas práticas de refrigeração e climatização no Estado do Maranhão.

O Brasil atingiu sua meta no ano de 2007 permitindo o reconhecimento por partes dos especialistas a importância da participação do setor privado, abrindo espaço para a inserção das novas tecnologias em diferentes segmentos. Embora os avanços na eliminação dos CFCs no Brasil e no mundo sejam significativos, a camada de ozônio ainda não está livre destas substâncias, uma vez que estes gases duram 100 anos na atmosfera. Assim, estima-se que entre os anos de 2050 a 2075, o escudo terrestre retornará aos níveis apresentados na década de 1990.

Notas baseadas em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-kioto.html>

O Protocolo de Kyoto é um Tratado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas. Estabelecem metas para a redução das emissões de GEE nos países desenvolvidos e nos países com economias de transição para o capitalismo como a Índia e a China. Criado em 1997, o Protocolo de Kyoto prevê a redução nas emissões de CO₂ nos países industrializados. Grande parte destes gases são produzidos pelas queimas dos combustíveis fósseis. O Protocolo de Kyoto estabelece metas com o objetivo de reverter os danos causados pelo aquecimento global, devido às emissões dos GEE (CO₂, CH₄, NO₂, HFCs, PFCs, HF₆). Os países industrializados que ratificaram o acordo se comprometeram a reduzir as emissões até o ano de 2012 em 5,2%, em relação aos níveis apresentados em 1990. As metas são personalizadas de acordo com a realidade de cada país. Entretanto, de acordo com as informações oficial da ONU afirmam que os países não estão conseguindo cumprir com as metas estabelecidas. Para os países em desenvolvimento como a China, Índia e Brasil estas medidas são voluntárias. As principais ações para a reduzir as emissões de GEE são citadas a seguir:

1. Reforma no setor de energia;
2. Reforma no setor de transportes;
3. Uso de fontes renováveis de energia;
4. Redução nas emissões de metano;
5. Redução do desmatamento através de programas específicos e fiscalização rígida;
6. Programas de reflorestamentos;
7. Incentivos a uma agricultura sustentável;

8. Cooperação entre os países, em termos de compartilhamento de informações e tecnologias;
9. Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (Créditos de Carbono). Este mecanismo prevê reduções das emissões de GEE de forma certificada. Os países que atingem as metas de redução podem negociar Créditos de Carbono com os países que não atingiram suas metas. O Crédito de Carbono é estimado para cada tonelada de carbono não lançado à atmosfera.

O Acordo de Paris também prevê metas para reduzir as emissões de GEE e traz uma nova proposta mais ambiciosa tanto para os países desenvolvidos quanto para os em desenvolvimento. Mais uma vez os Estados Unidos, que haviam ratificado o Acordo de Paris deixaram de cumprir sua parte, por entenderem que este não esteja diretamente ligado às questões climáticas e nem aos interesses norte-americanos.

O Brasil, por ser um país em desenvolvimento, não possui obrigações e prazos para a redução das emissões de GEE. No entanto, mesmo sem essas obrigações, a redução do desmatamento é uma prioridade brasileira dentro do Protocolo de Kyoto. A Contribuição Nacional Determinada, prevê uma redução em até 37% das emissões de GEE até 2025 e 43% em 2030. A elevação dos IMEE em condicionadores de ar e o uso de fluidos refrigerantes de baixo *GWP* contribui de forma significativa para a redução das emissões dos GEE.

ANEXO C - Metas de redução dos HFCs

	A5 Grupo 1	A5 Grupo 2	A2
Ano	2020-2022	2024-2026	2011-2013
Congelamento	2024	2028	-
1º degrau	2029 - 10%	2032 - 10%	2019 - 10%
2º degrau	2035 - 30%	2037 - 20%	2024 - 40%
3º degrau	2040 - 50%	2042 - 30%	2029 - 70%
4º degrau	-	-	2034 - 80%
Platô	2045 - 80%	2047 - 85%	2036 - 85%

Fonte: Elaboração própria.

Notas baseadas em: <http://www.protocolodemontreal.org.br>

1. Os HFCs são substâncias desenvolvidas como alternativa para a substituir os CFCs e os HCFCs.
2. A eliminação gradual dos HFCs representa uma grande contribuição aos esforços mundiais em manter o aumento da temperatura global abaixo de 2 °C.
3. Estima-se que com a eliminação destes gases será evitado um aumento na temperatura global de 0,5 °C até 2100 e uma redução de 70 bilhões de tCO₂.
4. Os países desenvolvidos (Estados Unidos, Canadá, Japão) e a União Europeia são classificados no Grupo A2.
5. Os países em desenvolvimento são classificados em dois grandes Grupos: Grupo 1, Brasil, Argentina, México, Países africanos e países europeus fora da UE. Grupo 2, Índia, Paquistão, Irã, Iraque e países do Conselho de Cooperação do Golfo.
6. As metas e os cronogramas assumidos pelo Brasil foram acordadas através de conversas com o setor privado, que consideraram os prazos do Grupo 1 factíveis para a realidade brasileira.

ANEXO D - Comparativo entre o R-410A e R-32

	R-410A	R-32
Fórmula	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃	CH ₂ F ₂
Composição	R32/R125 (50/50%)	R-32
Temperatura de Ebulição	-51,5 °C	-51,7 °C
<i>ODP</i>	0	0
<i>GWP</i>	1924	677
Flamabilidade (ASHRAE 34 & Draft ISO817)	Levemente inflamável (A2L)	Não-inflamável (A1)
Toxicidade	Não - Tóxico	Não - Tóxico
Óleo Lubrificante	Sintético	Sintético

Fonte: Elaboração própria.

A taxa de flamabilidade e de toxicidade em um fluido refrigerante é mostrada na tabela abaixo.

	Classe A: Não Tóxico	Classe B: Alta Toxicidade
Classe 3: Alta Flamabilidade	A3	B3
Classe 2: Baixa Flamabilidade	A2	B2
	A2L	B2L
Classe 3: Não - Inflamável	A1	B1

Fonte: Elaboração própria.

Notas baseadas em: <http://pt.fluorined-chemical.com/news/what-is-the-difference-between-r410a-and-r32-r-26452689.html>

- Propriedades térmicas: (a) Carga de fluido refrigerante reduzida em aproximadamente 29%; (b) Pressão de trabalho do equipamento com R-32 é superior ao equipamento com R-410A, entretanto este aumento não ultrapassa 2,6%.
- Propriedades ambientais: (a) *PDO* nulo para os dois fluidos refrigerantes; (b) *GWP* moderado para o R-32.
- Segurança: (a) Toxicidade nula para os dois fluidos refrigerantes; (b) O R-32 é levemente inflamável.
- Desempenho cíclico: (a) A capacidade de refrigeração do sistema com R-32 é 12,6% maior que a do R-410A; (b) A economia de energia no agregado está em torno de 4,3%; (c) a eficiência energética com o R-32 é ligeiramente superior ao R-410A.
- Características gerais: (a) O R-32 é parcialmente inflamável e explosivo, entretanto, seu *GWP* corresponde apenas 30%, em comparação com o R-410A. (b) O tempo de retenção na atmosfera do R-32 é 5,6 anos; (c) Em linhas gerais, o uso do R-32 é

justificado pelo fato de ser um fluido refrigerante mais ecológico e energeticamente eficiente.

No entanto, algumas precauções referentes à manipulação do R-32 devem ser levadas em consideração pelos técnicos:

1. É estritamente proibido o uso de cigarros, fogos e fontes de calor na manutenção dos equipamentos;
2. Recomenda-se não alongar o tubos das linhas de líquido e sucção do sistema. O alongamento desnecessário das tubulações aumentam o risco de vazamentos;
3. Recomenda-se a manipulação de equipamentos com R-32 somente por pessoas devidamente qualificadas;
4. Quando em reparo na unidade evaporadora, recomenda-se um sistema de ventilação de ar com vazão mínima de 500 m³/h. Este procedimento garante a renovação de ar fresco e a extração para fora do ambiente interno, evitando concentração de gases;
5. Quando em reparos na unidade condensadora, a ventilação só é necessária quando houver perigo nas concentração dos gases;
6. Recomenda-se sempre cortar as peças que sofrerão reparos; Se não for possível cortar as peças, recomenda-se usar um perfurador de tubos para garantir que não haja fluido refrigerante no interior do sistema;
7. Recomenda-se não inserir fluido refrigerante em excesso no equipamento;
8. Recomenda-se garantir que não haja presença de fluidos refrigerantes no interior do sistema.

ANEXO E - Check-List: Instalação Condicionadores de Ar

Sugestão de relatório de instalação	
Empresa instaladora	
Nome da empresa instaladora:	
Endereço:	
Telefone:	
Nome do técnico responsável:	
Cliente	
Nome do cliente:	
Endereço:	
Telefone:	
Informações do aparelho	
Marca e modelo:	Número de série:
Data da instalação:	
Horário da instalação:	
Fluido refrigerante:	
Quantidade do fluido refrigerante:	
Pressão de sucção:	
Pressão de descarga:	
Temperatura do ar na entrada do condensador:	
Temperatura do ar na saída do condensador:	
Temperatura do ar na entrada do evaporador:	
Temperatura do ar na saída do evaporador:	
Comprimento total da tubulação de interligação:	
Desnível da instalação:	
Dados elétricos	
Tensão da fonte de alimentação (V):	
Corrente elétrica total do aparelho (A):	
Corrente elétrica do compressor (A):	
Outras atividades para o comissionamento do sistema (marque o item abaixo, após conclusão do item). NOTA: Somente ferramentas e equipamentos adequados e confiáveis devem ser utilizados para o comissionamento do sistema	
<input type="checkbox"/> Realizar teste funcional do sistema, incluindo teste de desempenho	
<input type="checkbox"/> Verificar a existência de vazamentos no sistema	
<input type="checkbox"/> Verificar se as conexões elétricas foram corretamente fixadas	
<input type="checkbox"/> Verificar se o dreno da água condensada está com desnível adequado	
<input type="checkbox"/> Verificar o isolamento da tubulação	
<input type="checkbox"/> Verificar se os ventiladores estão livres para operação	
<input type="checkbox"/> Verificar a existência de ruídos anormais durante a operação do sistema	
<input type="checkbox"/> Limpar os componentes do sistema, incluindo filtro de ar	
<input type="checkbox"/> Limpar o display do controle remoto	
<input type="checkbox"/> Instruir o usuário sobre o funcionamento do aparelho de ar condicionado	

ANEXO F - Check-List: Manutenção Condicionadores de Ar

Registro de trabalho			
Proprietário:			
Local da instalação:			
Data da instalação:			
Tipo de Equipamento:			
Instalador:		Empresa:	
		Contato:	
Tipo de Fluido Refrigerante/Carga (Kg):			
Modelo/número de série do sistema:			
Conteúdo	Observações	Checado	
		Sim	Não
Verifique o funcionamento do aparelho de ar condicionado antes do início do serviço			
Verifique a tensão, corrente, aterramento, temperatura de entrada e saída do ar e desligar o ar condicionado antes da manutenção. Nota: O cliente deve ser informado dos dados verificados antes do início da manutenção.			
Limpeza do evaporador, condensador, ventilador e filtro de ar com água corrente ou produtos apropriados.			
Lubrificação dos motores dos ventiladores (apenas no caso de modelos antigos).			
Verifique as ligações dos fios nos terminais do compressor, capacitores e outros componentes elétricos.			
Ligue o aparelho para verificar funcionamento do ar condicionado após a manutenção.			
Verifique a tensão, corrente e aterramento após a conclusão do serviço.			
Detalhe sobre o trabalho de manutenção realizado e desempenho do ar condicionado para o cliente.			
Oriente os clientes quanto ao uso do aparelho e a economia de energia elétrica.			