

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELO PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE**

ROGÉRIO DIOGNE DE SOUZA E SILVA

TD: 06/2018

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROGÉRIO DIOGNE DE SOUZA E SILVA

**MODELO PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE**

TD: 06/2018

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROGÉRIO DIOGNE DE SOUZA E SILVA

**MODELO PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE**

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S586m Silva, Rogério Diogne de Souza e
Modelo para Tomada de Decisão em Programas de Eficiência Energética no Setor de Distribuição de
Eletricidade / Rogério Diogne de Souza e Silva. — 2018
115 f. : il. color
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de
Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
1. Eficiência energética. 2. Análise por envoltória de dados. 3. Distribuição de energia elétrica. 4.
Fronteira de eficiência. I. Tostes, Maria Emília de Lima, *orient.* II. Título
-

CDD 621.31

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“MODELO PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROGRAMAS DE
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE
ELETRICIDADE”**

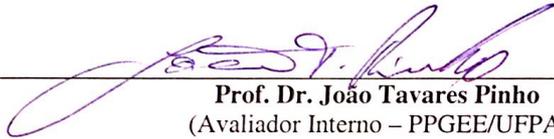
AUTOR: **ROGÉRIO DIOGNE DE SOUZA E SILVA**
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 27/04/2018

BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Orientadora – UFPA)

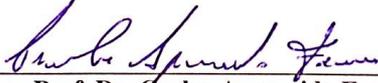


Prof. Dr. João Tavares Pinho
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos
(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)



Prof. Dr. Carlos Aparecido Ferreira
(Avaliador Externo – ELETROBRÁS – RJ)

VISTO:

Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Aos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, responsáveis pela minha formação em engenharia, representando esses cito: Maria Emília de Lima Tostes, Tadeu da Mata Medeiros Branco, João Tavares Pinho e Ubiratan Holanda Bezerra.

Agradeço em especial à amiga Prof.^a Maria Emília de Lima Tostes, pelo acompanhamento desde a graduação, pelas oportunidades e desafios fundamentais para minha trajetória e conquistas acadêmicas.

Aos professores Edson Ortiz de Matos, Carlos Aparecido Ferreira, João Tavares Pinho e Ubiratan Holanda Bezerra pelas contribuições com o texto final desta tese.

À minha esposa Rosana
Aos meus pais Raymundo e Raimunda, e minha irmã Rafaela

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIACÕES.....	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Contextualização.....	16
1.2. Motivações.....	18
1.3. Objetivos.....	18
1.4. Revisão bibliográfica.....	19
1.5. Contribuições.....	21
1.6. Estrutura da tese.....	21
CAPÍTULO 2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	23
2.1. Contextualização.....	23
2.2. Políticas e programas internacionais.....	34
2.3. Políticas e programas no Brasil.....	47
2.3.1. Programa Nacional de Conservação de Energia.....	51
2.3.2. Programa de Eficiência Energética.....	52
2.4. Considerações finais.....	56
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA PARA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	57
3.1. Considerações iniciais.....	57
3.2. Tratamento e filtragem de dados.....	58
3.3. Análise das variáveis.....	58
3.4. Modelagem utilizando o método da análise por envoltória dos dados.....	59
3.4.1. Escolha das variáveis e unidades de tomada de decisão.....	63

3.5. Simulação e Análise.....	65
3.6. Considerações finais.....	65
CAPÍTULO 4. ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA	
ENERGÉTICA.....	66
4.1. Análise geral dos projetos	66
4.2. Classificação dos projetos de eficiência energética.....	75
4.2.1. Simulação do modelo de análise por envoltória de dados.....	75
4.2.2. Estudo de caso	79
4.3. Considerações finais.....	85
CAPÍTULO 5. PROPOSTAS PARA O PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
BRASILEIRO.....	87
5.1. Análise das ações de eficiência energética	87
5.2. Análise modelo do cálculo de viabilidade.....	94
5.3. Análise de requisitos para um novo sistema de análise e gestão de projetos	95
5.4. Considerações finais.....	98
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES.....	100
6.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	103
REFERÊNCIAS.....	104
APÊNDICE A. TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A ELABORAÇÃO DA TESE	111
APÊNDICE B. TIPOLOGIAS DE PROJETO - DEFINIÇÕES.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo de casa inteligente.....	24
Figura 2. Cenários passado, atual e futuro do setor elétrico.....	25
Figura 3. Diagrama projeto piloto de formação de preço em tempo real.....	26
Figura 4. Aumento percentual no efeito da eficiência entre 2000-2016.	27
Figura 5. Múltiplos benefícios da eficiência energética segundo a IEA.	28
Figura 6. Aumento do PIB em relação à redução da demanda de energia.	29
Figura 7. Percentual de economia de energia em 2016 em decorrência de EEO.....	36
Figura 8. Funcionamento do mercado de <i>White Certificates</i>	39
Figura 9. Evolução dos preços dos WhC na Itália.....	40
Figura 10. Gasto per capita por políticas públicas para <i>retrofit</i> residencial.	43
Figura 11. Classificação dos países com ações para eficiência energética.	45
Figura 12. Gasto <i>per capita</i> com eficiência energética.....	46
Figura 13. Distribuição setorial do consumo de eletricidade ano base 2016.....	47
Figura 14. Histórico do Consumo de Energia Elétrica no Brasil entre 1999 e 2015.....	49
Figura 15. Histórico da energia economizada resultantes de ações do Procel.....	52
Figura 16. Fluxograma da metodologia de análise.....	57
Figura 17. Comparação entre DEA e regressão linear.	60
Figura 18. Representação das unidades de tomada de decisão.	61
Figura 19. Fluxograma do método DEA.....	61
Figura 20. Distribuição da energia economizada por região no Brasil 2008-2016.....	67
Figura 21. Energia economizada por habitante.	67
Figura 22. Custo total da energia economizada por região.....	68
Figura 23. Energia economizada por projeto para cada tipologia.	71
Figura 24. Redução da demanda no horário de ponta por projeto para cada tipologia....	71
Figura 25. Custo total da energia economizada por tipologia.....	72
Figura 26. Relação custo-benefício por tipologia.	73
Figura 27. Energia economizada por projeto por uso final.....	73
Figura 28. Redução da demanda no horário de ponta por projeto por uso final.....	74
Figura 29. Relação custo benefício por uso final.	74
Figura 30. Classificação dos projetos utilizando modelo DEA - Fronteira de eficiência. ..	77
Figura 31. Grau de influência das DMU eficientes.	78

Figura 32. Fluxo de caixa cumulativo do projeto - Caso PEE.....	84
Figura 33. Fluxo de caixa cumulativo do projeto - Caso fronteira de eficiência.....	85
Figura 34. Estimativa do potencial de geração de energia no setor sucroalcooleiro – região Sudeste.	90
Figura 35. Estimativa do potencial de geração de energia a partir de resíduos agrícolas - região Sul.	91
Figura 36. Fluxograma com proposta de novo processo de execução do PEE.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Barreiras à promoção da eficiência energética.	30
Tabela 2. Influência de incentivos financeiros para redução do consumo de energia residencial.....	31
Tabela 3. Exemplos de comportamento para transição de consumo de energia sustentável. ...	32
Tabela 4. Diretivas da União Europeia sobre Eficiência Energética.....	35
Tabela 5. Comparação dos custos dos programas de EEO.....	37
Tabela 6. Custos dos participantes.	37
Tabela 7. Impacto das EEOs no consumo de energia.....	37
Tabela 8. Relação de países com políticas e programas de certificação e retrofit de edificações.	42
Tabela 9. Evolução das edificações com consumo reduzido de energia.	44
Tabela 10. Políticas públicas para os NZEB.....	44
Tabela 11. Metas do programa para 2020 e total realizado em 2014.....	45
Tabela 12. Principais instrumentos de regulação brasileiros para a eficiência energética.	50
Tabela 13. Indicadores de resultados do Procel em 2016.....	51
Tabela 14. Variáveis usadas no modelo DEA.....	64
Tabela 15. Distribuição percentual da energia economizada por tipologia para cada região..	69
Tabela 16. Programa Brasileiro de Eficiência Energética - Total de dados por tipologia.....	70
Tabela 17. Dados das DMU utilizados na simulação.....	76
Tabela 18. Índices de eficiência e pesos para cada DMU.....	76
Tabela 19. Análise de <i>benchmarking</i>	77
Tabela 20. Aumento percentual para limite de eficiência - Modelo orientado a entrada.....	78
Tabela 21. Ações de eficiência energética - equipamentos linha de base.	80
Tabela 22. Ações de eficiência energética- equipamentos projeto proposto.	80
Tabela 23. Detalhamento de Custos do projeto.....	80
Tabela 24. Resumo resultados do projeto- Caso PEE	81
Tabela 25. Metas para fronteira de eficiência – poder público.	81
Tabela 26. Resumo dos resultados do projeto - Caso fronteira de eficiência.	82
Tabela 27. Parâmetros financeiros.....	83
Tabela 28. Resultados da viabilidade econômica - Caso PEE.....	83
Tabela 29. Resultados da viabilidade econômica - Caso fronteira de eficiência.	84

Tabela 30. Correlação entre ações de eficiência energética e tipologias.....	89
Tabela 31. Sistemas para projetos de eficiência energética internacionais.....	96

LISTA DE ABREVIACÕES

ACEEE	<i>American Council for Energy-Efficient Economy</i>
AEE	Ação de Eficiência Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CPUC	<i>California Public Utilities Commission</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decision Making Unit</i>
EED	<i>Energy Efficiency directive</i>
EEO	<i>Energy Efficiency Obligation</i>
EEPS	<i>Energy Efficiency Portfolio Standard</i>
ESCOS	Empresas de Serviços de Conservação de Energia
ESD	<i>Energy end use efficiency and energy services directive</i>
EUA	Estados Unidos da América
GLD	Gerenciamento pelo lado da demanda
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MBI	<i>Market Based Instruments</i>
M&V	Medição e Verificação
NZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i>
PIB	Produto Interno Bruto
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PEE	Programa de Eficiência Energética
PNEF	Plano Nacional de Eficiência Energética
ROL	Receita Operacional Líquida
SFA	<i>Stochastic Frontier Analysis</i>
UC	Unidade Consumidora
UE	União Europeia
WHC	<i>White Certificate</i>

RESUMO

O sistema de distribuição de energia elétrica está em constante evolução, com a disseminação de recursos energéticos distribuídos, redes inteligentes e a inclusão de mercados competitivos, em que o uso da eficiência energética como recurso relevante para o planejamento do setor deve ser assegurado por meio de políticas públicas. O Brasil há décadas possui programa e política nessa área, entretanto, os resultados do seu programa para a inserção de ações de eficiência energética com recursos financeiros das concessionárias de distribuição têm impacto inferior a programas similares em outros países, somado a isso há a iminente necessidade de atender os objetivos de redução de emissões propostos pelo país na 21ª Conferência das Partes das Nações Unidas em dezembro de 2015 em Paris. Nesse contexto, a presente tese propõe o desenvolvimento de um modelo não-paramétrico, para determinação de indicadores de desempenho e classificação de projetos de eficiência energética. Contribui-se, também, com a avaliação do Programa de Eficiência Energética, por meio de uma metodologia para analisar os projetos, classificar e quantificar as variáveis, resultando em recomendações para o aprimoramento do programa. Utilizou-se uma base de dados de projetos submetidos à ANEEL pelas concessionárias do setor de distribuição de energia elétrica no período de 2008 a 2016. O modelo foi desenvolvido usando *Data Envelopment Analysis* (DEA), um método não-paramétrico que utiliza programação linear para calcular as unidades mais eficientes em um determinado conjunto de unidades de tomada de decisão. Os resultados obtidos revelam que o melhor desempenho foi alcançado por projetos nas categorias industrial e de cogeração, no entanto, estes constituem apenas, 4,24 % dos projetos apresentados e 5,28 % dos investimentos totais nos últimos oito anos, indicando a necessidade de rever as estratégias regulatórias de eficiência energética. Como uma solução para a seleção de projetos com melhor desempenho, sugere-se atribuir pesos às categorias para otimizar os resultados dos projetos, através de incentivos aos projetos com melhor desempenho, sem excluir a participação de todos os outros, simplesmente fornecendo objetivos de economia de energia e redução de demanda no horário de ponta, compatíveis com as categorias com melhores resultados.

Palavras-chave: Eficiência energética, Análise por envoltória de dados, Distribuição de energia elétrica, Fronteira de eficiência.

ABSTRACT

The electricity distribution system is constantly evolving, with the dissemination of distributed energy resources, smart grids and the inclusion of competitive markets, in which the use of energy efficiency as a relevant resource for sector planning must be ensured through public policy. Brazil has for decades had a program and policy in this area, however, the results of its program for the insertion of energy efficiency actions with the financial resources of the electricity utilities, have less impact than similar programs in other countries, and there is the imminent need to meet the emission reduction targets proposed by the country at the 21st Conference of the Parties of the United Nations in December 2015 in Paris. In this context, the present thesis proposes the development of a non-parametric model for the determination of performance indicators and classification of energy efficiency projects. It also contributes to the evaluation of the Energy Efficiency Program, through a methodology to analyze the projects, classify and quantify the variables, resulting in recommendations for the improvement of the program. A database of projects submitted to ANEEL by the utilities of the electricity distribution sector from 2008 to 2016 was used. The model was developed using Data Envelopment Analysis (DEA), a non-parametric method that uses linear programming to calculate the most efficient units in a given set of decision-making units. The results show that the best performance was achieved by projects in the industrial and cogeneration categories, however, these constitute only 4.24 % of the projects presented and 5.28 % of the total investments in the last eight years, indicating the need to review energy efficiency regulatory strategies. As a solution to improve the selection of the best performing projects, it is suggested assigning weights to the categories to optimize the project results, by incentives to the projects with the best performance, without excluding the participation of all others, simply by providing energy savings goals and demand reduction at peak hours compatible with the best performing categories.

Keywords: Energy efficiency, Data envelopment analysis, Electric power distribution, Efficiency frontier.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A eficiência energética constitui um recurso com grande potencial e baixo custo, que pode reduzir em torno de 20 % o uso final de energia, com custos substancialmente menores que a implantação de novas fontes de geração, além de ser um excelente mecanismo de redução de emissões de carbono (ICF, 2009). Segundo Thoyre (2015), a economia de 20 a 24 % de energia pode reduzir cerca de 40 % das emissões de gases estufa, contribuindo para o alcance de metas das políticas climáticas vigentes globalmente. De acordo com a *International Energy Agency* - IEA, além da conservação de energia e redução de emissões, ações de eficiência energética potencializam outros benefícios, tais como: segurança energética, redução dos preços de energia, impactos macroeconômicos, produtividade industrial, diminuição do orçamento público, saúde e bem-estar, entre outros.

Globalmente, observa-se a atuação de programas para a promoção de eficiência energética executados por concessionárias de energia elétrica, os quais consistem principalmente em ações de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD). Em primeira análise é antagônico pensar que uma concessionária cujo produto seja a comercialização de eletricidade, invista na redução do consumo do seu principal produto, no entanto, evoluções em curso no mercado de eletricidade, como a inclusão de mercados competitivos na distribuição, redes elétricas inteligentes e geração distribuída, têm indicado mudanças no modelo de negócio das concessionárias e sobretudo quanto às ações de eficiência energética nesse setor.

Segundo IEA (2016) a eficiência energética deve ser considerada no planejamento energético dos países, sendo consolidada por meio de estratégias públicas e/ou privadas que definam ações de incentivo como forma de fomentar mercados, ao ponto de que esta seja mensurável e factível de ser utilizada nas políticas e conseqüentemente no planejamento energético, como se esta fosse uma fonte de energia. Essa afirmação fundamenta-se nos resultados de energia evitada em 2010 por países membros da IEA, relativos a investimentos entre o período 1974-2010, o qual foi maior que qualquer outra fonte única de energia. Como outro exemplo do impacto da eficiência energética esta no caso de países membros da IEA, que economizaram em média, US\$ 490 *per capita* em um total de US\$ 540 bilhões gastos com energia

em 2015, como resultados de ganhos com eficiência energética desde 2000, além de 1,5 bilhão de toneladas de CO₂ evitados em 2015, e 13 GtCO₂ desde 2000 (IEA, 2016).

Reduzir a demanda e o consumo de energia tem sido a principal ação para as políticas de eficiência energética tanto em relação à demanda quanto à oferta em vários países. Esse objetivo é alcançado por meio da melhoria da eficiência dos produtos e processos que consomem energia. Instrumentos eficazes para concretizar as metas de conservação de energia são medidas para melhorar a eficiência de bens, serviços e processos que consomem energia em todos os setores, essas medidas induzem políticas que têm como alvo a demanda como o estabelecimento de padrões de desempenho para edificações, requisitos de mínima eficiência para equipamentos, promoção de gestão energética em indústrias e demais unidades consumidoras, entretanto, é fundamental que tais instrumentos sejam bem projetados e conectados a metas realísticas monitoradas com precisão.

O desenvolvimento de instrumentos regulatórios é imprescindível para o sucesso de estratégias de inserção da eficiência energética no planejamento energético dos sistemas de energia no mundo. Apajahlati *et al.* (2015) afirmam que ações de conservação de energia contribuem significativamente para o combate às alterações climáticas e à insegurança energética. Em seu trabalho, avalia a influência das diretivas 2006/32/UE e 2012/27/UE, que implantaram os regimes de obrigação de investimento em eficiência energética na Europa. Segundo Rosenow (2012), o Reino Unido foi o primeiro país da Europa a realizar ações obrigatórias de conservação de energia, que tiveram início em 1994. Esse mecanismo é específico para o setor residencial, sendo considerado a principal ação para economia de energia e redução de emissões de gases poluentes nesse setor, resultando em economias da ordem de 90 TWh/ano de energia elétrica.

No contexto internacional, torna-se bastante evidente a relação indissociável entre questões energéticas e as mudanças climáticas. Inclusive, na 21^a *Conference of the Parties of United Nations - COP 21*, realizada em dezembro de 2015 em Paris, participaram 189 países, resultando em 162 *Intended Nationally Determined Contributions – iNDC*, as quais consistem em propostas de ações e definições de metas para a redução de gases estufa. O acordo entre os países objetiva limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2° C em relação aos níveis pré-industriais, substituindo outras metas estipuladas no protocolo de Kyoto, incluindo revisão a cada cinco anos. Em relação às iNDC's propostas, 143 mencionam ações de eficiência energética, no entanto, poucas citam novas políticas para o setor (BRASIL, 2015).

1.2. Motivações

Um desafio fundamental para a eficiência energética no setor de distribuição, reside no fato de que o modelo tradicional de negócios do fornecedor de energia é baseado na recuperação de investimentos por meio da comercialização de unidades de energia. Esse modelo incentiva a venda de mais energia e obscurece a oportunidade de negócio que existe na implementação de medidas de eficiência energética. É necessária uma mudança de paradigma, para incentivar os atores do mercado de energia a avaliarem a eficiência energética como recurso econômico e não como uma barreira ou desincentivo aos investidores.

No contexto ambiental, o Brasil propôs como iNDC reduções de emissões de 37 % até 2025, e 43 % até 2030, e como uma das ações o aumento de 10 % em eficiência energética no país, tomando como linha de base o Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf (BRASIL, 2011; BRASIL, 2015). Apresentando resultados dos principais programas para a economia e uso eficiente de energia, cita-se, o Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, e o PEE – Programa de Eficiência Energética, proporcionaram, nos últimos trinta e dois anos, a economia de 107 TWh por meio do Procel, enquanto, em relação ao PEE, os projetos apresentados nos últimos dezoito anos totalizam 9,48 TWh/ano de redução do consumo de eletricidade e 2,95 GW de redução de demanda no horário de ponta (PROCEL, 2017; ANEEL, 2016).

Apesar do expressivo resultado desses programas, o Brasil não se encontra em situação confortável, segundo o *American Council for Energy Efficiency Economy* - ACEEE, por meio de um estudo em que apresenta a análise de diversos aspectos e indicadores. Um dos indicadores é o gasto *per capita* dos países com ações de eficiência energética, em que o Brasil investe US\$ 3,29, enquanto a Alemanha, primeira colocada na classificação, investe US\$ 318,49. Outro indicador refere-se à gestão energética, no Brasil em 2016 foram certificadas 22 empresas em ISO 50.001, melhor desempenho da América do Sul, seguido pelo Chile com 17 empresas certificadas. Quanto a Europa, o destaque é a Alemanha com 9.024 empresas com tal certificação em 2016 (KALLAKURI *et al.*, 2016; ISO, 2017).

1.3. Objetivos

Diante do contexto apresentado verificou-se que, embora, o Brasil tenha apresentado um histórico de ações para a promoção da eficiência energética, os resultados do seu principal programa para a inserção dessas ações no sistema de distribuição de energia elétrica, têm impacto inferior a programas similares em outros países. Nesse sentido, apresenta-se nesta tese

uma proposta para maximizar o desempenho dos projetos submetidos e executados pelo Programa de Eficiência Energética, além de identificar barreiras à execução do programa e propor alterações para ampliar seus resultados.

Este objetivo distribui-se nos seguintes objetivos específicos:

- Contextualizar o tema da pesquisa, por meio da caracterização do cenário internacional e Brasileiro;
- Analisar os projetos de eficiência energética submetidos à ANEEL entre 2008 e 2016;
- Elaborar um modelo matemático para determinar indicadores de desempenho das tipologias de projetos e classificá-los, assim como obter pesos para ajustar os projetos classificados como ineficientes;
- Identificar barreiras e propor contribuições ao Programa de Eficiência Energética Brasileiro.

1.4. Revisão bibliográfica

Behrangrad (2015) avaliou modelos de negócios de GLD em diferentes segmentos de mercado de eletricidade de vários países, afirmando que modelos de negócios são influenciados por fatores diversos, como: regulação do mercado, características do sistema de energia e infraestrutura. Destacando que tais fatores passam por mudanças atualmente, com a proliferação de infraestrutura de rede inteligente, geração distribuída, energias renováveis intermitentes e dispositivos de armazenamento, afetando os modelos de negócios de GLD.

Abrardi *et al.* (2015) propõem um modelo tarifário ótimo, que induza ações de eficiência energética pelo lado da demanda. Indicam que a empresa distribuidora de energia ou o organismo de regulação deve propor opções tarifárias compatíveis para ambas as partes, exemplo, se as atividades de eficiência energética da distribuidora têm alto impacto na redução da demanda, o consumidor deve pagar um valor de demanda elevado, mas, um valor reduzido pelo consumo de eletricidade, porém, se a concessionária não realiza ações de eficiência energética, ou estas são de baixo impacto, o valor da tarifa de demanda é mais baixo, e o valor pago pelo consumo de eletricidade é maior.

Slazvik *et al.* (2012) e Thoyre (2015) analisaram como a eficiência energética pode ser utilizada como fonte a partir de políticas públicas considerando-se as mudanças climáticas. Thoyre (2015) utilizou os dados da Carolina do Norte, EUA, como referência em comparação a outros trinta e cinco estados americanos que adotam políticas nessa área. Como conclusão, o autor inferiu que tais projetos tendem a enfatizar a eficiência energética pelo lado da demanda,

e, raramente, impactam o lado da oferta, limitando o potencial de redução do consumo de eletricidade e, conseqüentemente os benefícios climáticos. Slazvik *et al.* (2012) avaliaram a política energética húngara e seu papel no plano de recuperação econômica do governo húngaro, a partir da Estratégia Nacional de Energia 2030, a qual leva a política climática em conta no que diz respeito à adaptação e mitigação, considerando as fontes de energia renováveis como importantes ferramentas para alcançar objetivos estratégicos, aliadas ao aumento da economia de energia, como solução de curto prazo com custos suportáveis e um retorno relativamente rápido sobre o investimento.

Calili *et al.* (2014) apresentam um modelo para previsão de economia de energia no Brasil, cujos resultados indicam que, com a economia de 1 % de energia elétrica por ano, em cinco anos, os ganhos seriam entre US\$ 70 e 80 milhões por ano e 3.500 MtCO₂eq/ano de emissões evitadas. Entretanto, o investimento na hidrelétrica de Belo Monte, foi de US\$ 7,8 bilhões, com retorno de investimento de trinta anos, ou seja, investimentos em eficiência energética têm melhor retorno de investimento que uma nova usina hidrelétrica.

Diversos autores utilizaram DEA, de forma isolada ou em estruturas híbridas, associadas a outras técnicas de modelagem, Pacudan *et al.* (2002) desenvolveram um modelo utilizando DEA, para simular o efeito das políticas de eficiência energética no sistema de distribuição de energia nas Filipinas. Por meio da metodologia desenvolvida, os autores classificaram quinze distribuidoras em relação a sua eficiência técnica e operacional, e a influência de ações de eficiência energética pelo lado da demanda em seu desempenho, em que os resultados indicam que economias de energia a partir de 19,8 % proporcionam aumento de produtividade operacional das concessionárias.

Chen *et al.* (2014) desenvolveram um modelo utilizando DEA associado a *Slacks Based Measures* (SBM), para determinar o fator de eficiência da economia regional na China, considerando o uso da terra, energia e emissões de gases estufa. Alvarez *et al.* (2010) desenvolveram um modelo utilizando DEA, orientado à entrada e com retorno variável de escala (VRS), com intuito de analisar a eficiência de mecanismos regulatórios da Itália, Brasil e Chile para o incremento de eficiência energética na rede elétrica de distribuição.

Oh *et al.* (2014) elaboraram um modelo estocástico e determinístico, utilizando *Stochastic Frontier Analysis* (SFA) e DEA, para medir a efetividade das iniciativas de economia de energia em indústrias automotivas, resultando na escolha dos melhores projetos de redução de consumo de energia. Lee *et al.* (2012), por meio de um modelo híbrido com técnicas de *Rought Set Theory* (RST) e DEA, determinaram a eficiência na transferência de energia em sistemas fotovoltaicos. Zeng *et al.* (2016), desenvolveram um modelo DEA, para

solucionar um problema de alocação eficiente de carbono, para um mecanismo de concessão de licenças de emissão de ativos financeiros, utilizando como linha de base dados de trinta províncias chinesas.

1.5. Contribuições

Com base nesse cenário, objetivando contribuir para o avanço do mercado de eficiência energética brasileiro, elaborou-se um modelo matemático utilizando um método não paramétrico denominado *Data Envelopment Analysis* – DEA (em português, análise por envoltória de dados), com o intuito de avaliar os resultados do Programa de Eficiência Energética Brasileiro, e contribuir para a geração de indicadores e atributos para a melhor tomada de decisão, quanto ao direcionamento dos investimentos, bem como as ações mais significativas para a otimização dos resultados. Destaca-se também, a identificação de barreiras à execução do programa e apresentação de propostas de solução.

1.6. Estrutura da tese

O trabalho é estruturado em seis capítulos, iniciando com o presente capítulo introdutório.

No capítulo 2, aborda-se a eficiência energética no setor de distribuição de energia elétrica, apresentando a contextualização do setor, caracterizam-se os benefícios e barreiras aos programas de eficiência energética. As políticas e programas de eficiência energética no setor de distribuição de vários países são apresentadas, assim como os programas brasileiros.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia para análise e classificação de projetos de eficiência energética. Aborda-se o detalhamento do modelo desenvolvido, por meio do método não paramétrico *data envelopment analysis*, para a determinação de indicadores de eficiência.

A análise e a definição de indicadores para o programa de eficiência energética brasileiro são apresentadas no Capítulo 4. Utilizam-se os resultados do programa de eficiência energética no período de 2008 até 2016, a partir de uma base de dados com 1.704 projetos, distribuídos nas variáveis energia economizada, redução de demanda no horário de ponta, custo total do projeto, custo total da energia economizada e relação custo benefício. Os dados são analisados e distribuídos de acordo com a região do país e tipologias de projetos de eficiência energética. A resposta do modelo é a formação de uma fronteira de eficiência, a partir da classificação dos projetos de eficiência energética. Um estudo de caso, para demonstrar a

factibilidade da hipótese proposta, também é apresentado, bem como a validação do modelo elaborado.

No capítulo 5, os resultados obtidos nos capítulos anteriores são discutidos, analisando-se e efetuando propostas para o Programa de Eficiência Energética brasileiro, objetivando a redução de barreiras à adoção e execução de projetos e, conseqüentemente, o melhor desempenho do programa.

Ao final, no capítulo 6, as conclusões e propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros são apresentadas.

CAPÍTULO 2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O setor de distribuição de energia elétrica evoluiu rapidamente nas últimas décadas, apresentando avanços tecnológicos e regulatórios, além de atender a necessidade de redução de emissões prejudiciais ao meio ambiente, contribuindo para as alterações dos modelos de mercado observados atualmente.

As ações de eficiência energética há anos acompanham o setor de distribuição, inicialmente com objetivos de atender as unidades consumidoras em um cenário de escassez de fontes primárias, reduções de perdas, emissões, entre outros. Hoje, a adoção de políticas e programas de eficiência energética reguladas pelo Estado configuram-se como pilar fundamental da política energética de diversos países. Tais políticas podem incentivar a eficiência energética ao exigir ou motivar as concessionárias de energia elétrica a atenderem parte de sua demanda por meio de medidas de eficiência energética. No entanto, os benefícios para as empresas de energia em relação à implementação das iniciativas de eficiência energética não são claros, o que enfraquece a adoção destas pelas concessionárias.

Neste capítulo apresentam-se as características do modelo de distribuição atual, o histórico da utilização de ações de eficiência energética internacionalmente e no Brasil, destacando os benefícios, as barreiras, assim como o comportamento do consumidor e a relação entre os atores do mercado de energia.

2.1. Contextualização

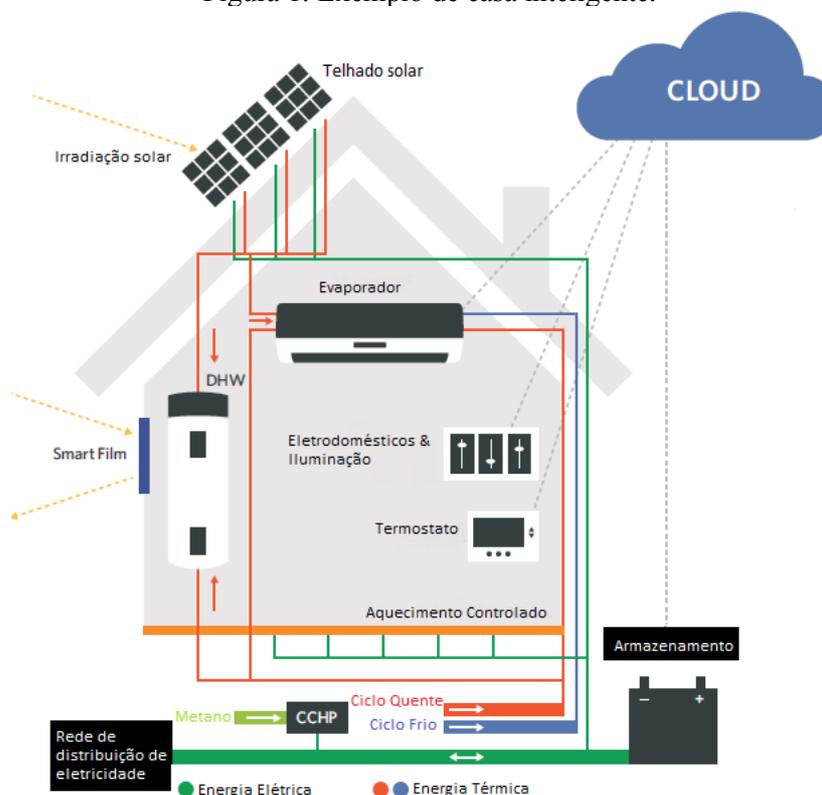
A mudança de paradigma de atuações das empresas do setor elétrico pode ser observada atualmente, transitando do modelo de negócios com foco na venda de maior quantidade de energia, para a abordagem de um modelo de provedor de serviços de energia, nesse contexto inclui-se o fornecimento ao cliente de múltiplos benefícios resultantes da eficiência energética.

O setor de distribuição de energia elétrica evoluiu significativamente no âmbito regulatório e tecnológico nas últimas décadas, e as mudanças ainda estão em curso, objetivando a implantação e consolidação das redes inteligentes. Diversos autores abordam a relação das redes inteligentes de energia e a mudança de paradigma dos sistemas de distribuição, considerando que energia limpa, segura e eficiente é um dos grandes desafios atualmente. De acordo com Agüero *et al.* (2016), a indústria da eletricidade evoluiu a um ritmo que lembra as transformações ocorridas no início do século XX. Esta evolução é impulsionada por vários

fatores, principalmente pelo surgimento da geração distribuída, para atender as preocupações da sociedade quanto à utilização de energias renováveis, redução das emissões de gases do efeito estufa e eficiência energética, bem como a introdução de uma infinidade de novas tecnologias e soluções de controle, automação e eletrônica de potência.

Com a disseminação da geração distribuída, o consumidor do sistema de distribuição passa a agregar a função de fornecedor do excedente de energia para a rede (prosumidor). No cenário futuro, o protagonismo dos consumidores será ampliado através de dispositivos de automação e controle, edificações inteligentes integrarão o sistema de distribuição de forma ativa. Pérez-Arriaga *et al.* (2016), exemplificam esse contexto através da Figura 1.

Figura 1. Exemplo de casa inteligente.



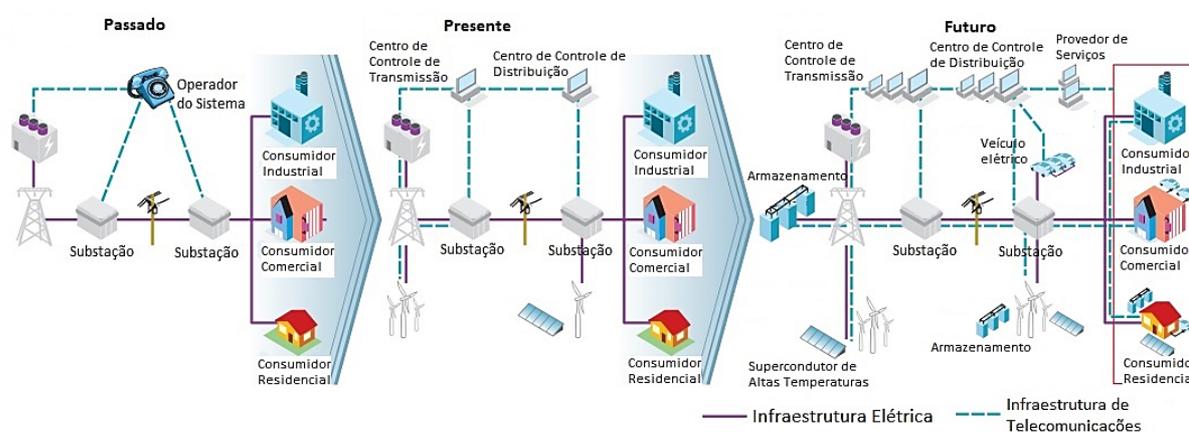
Fonte: Adaptado de Pérez-Arriaga *et al.* (2016).

Na Figura 1, tem-se a ilustração de uma residência inteligente, com painéis solares térmicos e fotovoltaicos, armazenamento elétrico e térmico e uma unidade de climatização de ciclo combinado, todas tecnologias existentes, porém, com o diferencial da conexão a um sistema de computação e gerenciamento armazenado em nuvem. Possibilitando, o gerenciamento dos usos finais de energia em regime permanente, por exemplo, controlar o funcionamento do ar condicionado de acordo com a carga térmica da edificação em tempo real. A mudança de paradigma é verificada no desenvolvimento de algoritmos de otimização,

levando em consideração restrições de eficiência, preço, estratégias de resposta da demanda, emissões ambientais, e demais serviços de eletricidade, permitindo a melhor tomada de decisão ao acesso ao mercado de energia elétrica.

Segundo Vasconcelos (2016), o futuro das redes elétricas está correlacionado ao aumento da capacidade computacional, resultando em uma nova relação entre os agentes do sistema, exemplificado pela Figura 2, com o cenário futuro indicando a utilização de novas tecnologias, como os supercondutores, veículos elétricos e dispositivos de armazenamento, bem como a inserção do provedor de serviços como novo agente do setor.

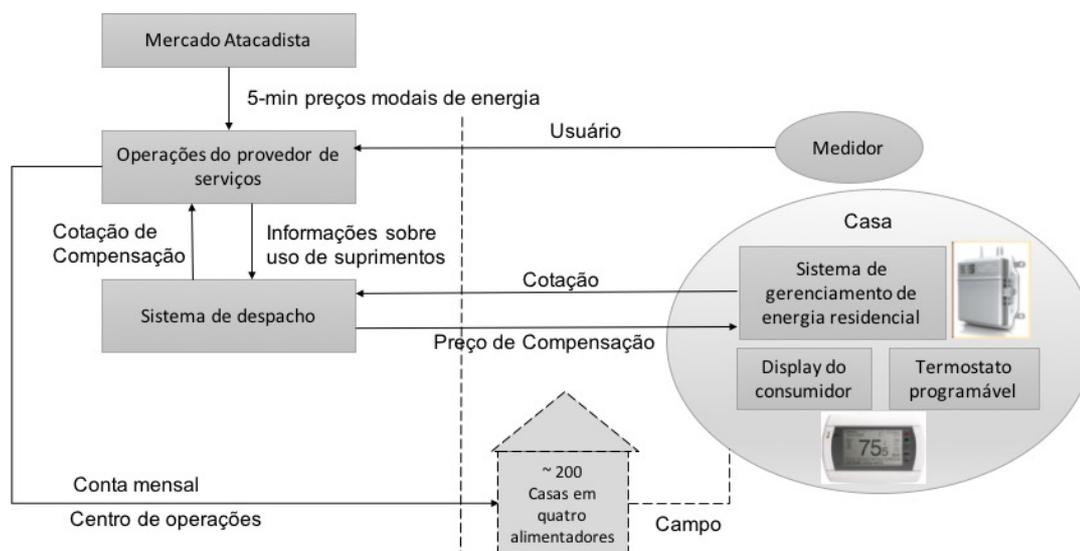
Figura 2. Cenários passado, atual e futuro do setor elétrico.



Fonte: Adaptado de IEA (2011).

Considerando o novo ambiente de mercado, que surge com as redes de distribuição inteligentes, Kok *et al.* (2016) apresentam um projeto piloto de resposta da demanda em consumidores residenciais, em Ohio, EUA, que consiste na demonstração de formação de preço em tempo real. O diagrama da Figura 3 apresenta a estrutura de mercado para despachar cargas responsivas dos participantes, considerando as preferências dos ocupantes das residências, com a formação de uma curva de flexibilidade de preços global para as ações de gerenciamento e controle de cargas domésticas, no caso, aquecimento, ventilação e ar condicionado. A partir das propostas de todas as residências para formar uma curva de demanda sensível ao preço do sistema de distribuição, determina-se um preço de compensação.

Figura 3. Diagrama projeto piloto de formação de preço em tempo real.

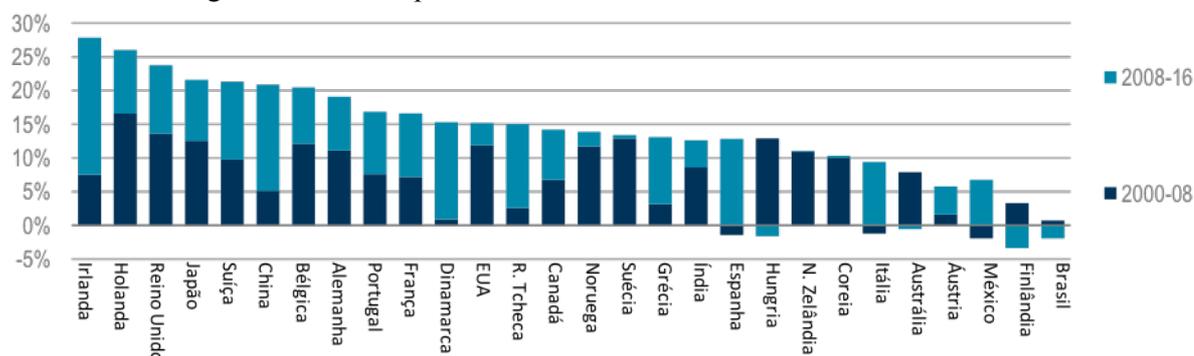


Fonte: Adaptado de Kok *et al.* (2016).

O contexto apresentado é denominado de *Transactive Energy*, conceituado por Forfia *et al.* (2016) como “um conjunto de mecanismos econômicos e de controle que permite o equilíbrio dinâmico de oferta e demanda em toda a infraestrutura elétrica, usando o valor como um parâmetro operacional chave”.

O cenário apresentado por Pérez-Arriaga *et al.* (2016), Vasconcelos (2016), Kok *et al.* (2016) e Forfia *et al.* (2016), denota que o avanço da inserção das tecnologias de informação, modifica a relação entre os agentes do setor, alterando a formação do preço de energia, o maior protagonismo dos consumidores, e a relevância direta da eficiência energética no planejamento do setor em vários países. Na Figura 4, apresenta-se a variação do efeito de eficiência entre 28 países. Oito dos dez melhores países que mostram a maior melhora no efeito de eficiência desde 2000 são europeus, com todos, exceto a Suíça, abrangidos pela Diretiva de Eficiência Energética da União Europeia, em vigor desde 2012. Destaca-se, também, a China, com um ganho de 16% no efeito de eficiência desde 2008. O Brasil, aparece em última posição, com redução do efeito da eficiência entre 2008 e 2016.

Figura 4. Aumento percentual no efeito da eficiência entre 2000-2016.



Fonte: Adaptado de IEA (2017).

Nos EUA, segundo Thoyre (2015), tais mudanças de perspectivas provocaram entre os participantes do mercado uma nova visão em relação à eficiência energética, gerando as seguintes denominações: recurso de baixo custo, quinto combustível, usina de energia virtual, recurso de energia limpa, recurso com uma curva de oferta como qualquer outro recurso. E sendo classificada como recurso energético oficialmente por meio de decretos e normas em alguns estados, como Indiana, Vermont, Novo México e Delaware. A eficiência energética, associada à promoção de benefícios ambientais, conceitua-se de forma ampla como energia sustentável.

O uso eficiente da energia elétrica caracteriza-se por gerar benefícios diretos e frequentemente citados na literatura, como os custos evitados em geração, transmissão e distribuição, como consequência de redução nas emissões de CO₂, em países com regulamentação de limites de emissão contabiliza-se a redução como custo evitado das emissões, podendo resultar na redução do preço da energia no mercado. Para as empresas distribuidoras de energia elétrica, a eficiência energética pode ajudar a melhorar a confiabilidade do sistema, aumentar a adequação da capacidade, gerenciar melhor a demanda no horário de ponta, otimizar a utilização da geração e os recursos da rede, criar oportunidades para adiar a geração e o investimento em rede, e atenuar a volatilidade dos preços nos mercados atacadistas. Podem-se citar outros benefícios indiretos ao mercado de distribuição da adoção de ações de eficiência, como redução de atrasos e inadimplência, menores custos de cobrança e, em mercados de varejo competitivos, aumentar fidelização de clientes.

Segundo IEA (2014), os países que adotam políticas com obrigações de eficiência energética, tornaram-se propícios para melhor aproveitar toda a gama de benefícios da eficiência energética para todas as partes envolvidas no mercado de distribuição de eletricidade.

Nesse ambiente, a abordagem dos múltiplos benefícios da eficiência energética revela um amplo espectro de impactos positivos, conforme o diagrama da Figura 5.

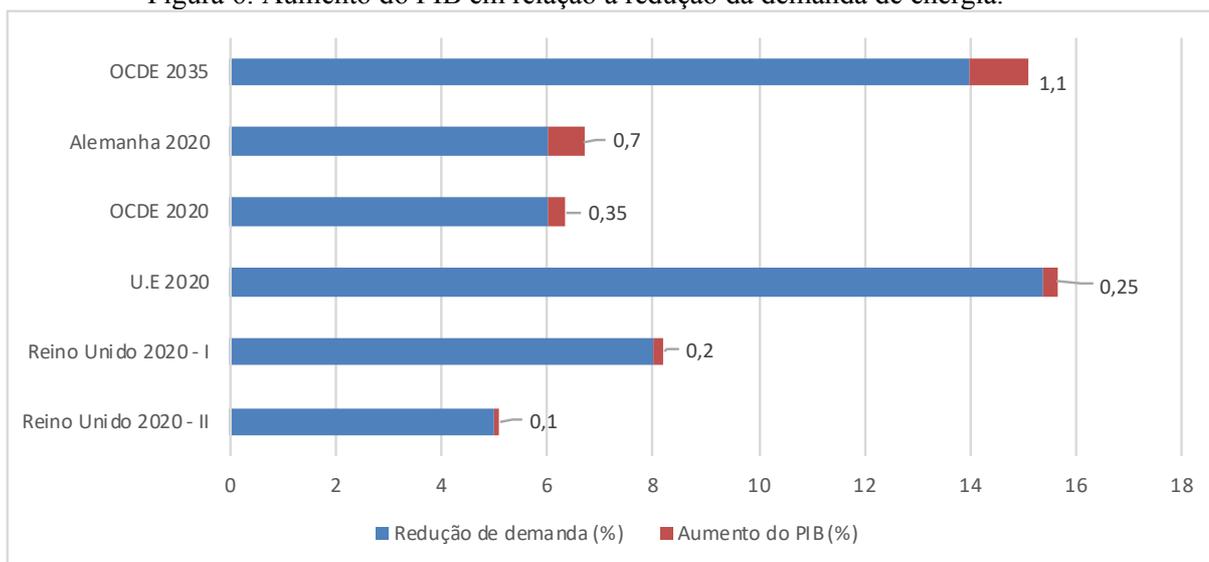
Figura 5. Múltiplos benefícios da eficiência energética segundo a IEA.



Fonte: Adaptado de IEA (2014).

Os impactos macroeconômicos são benefícios que podem ser caracterizados por quatro indicadores chave: PIB, geração de empregos, preço da energia e balança comercial. De acordo com IEA (2014), uma avaliação da diretiva 2012/27/UE da União europeia estimou que o PIB poderia aumentar em 0,25% se as medidas de eficiência energética reduzirem em 15,4% a demanda de energia primária até 2020 (em comparação com as projeções de referência). Na Figura 6 apresentam-se resultados de projeções de aumento do PIB em relação a redução de demanda resultante de ações de eficiência energética.

Figura 6. Aumento do PIB em relação à redução da demanda de energia.



Fonte: Adaptado de IEA (2014).

O aumento de investimentos e criação de um mercado de eficiência energética, também, apresenta como consequência benéfica o aumento de empregos. Urge-Vorsatz *et al.* (2010) avaliaram cenários de geração de empregos como consequência do mercado criado pelo programa de eficiência energética em edificações da Hungria, inferindo, por meio de um modelo mais conservador, que o total de empregos em 2020 será de 52.000 pessoas atuando nesse mercado.

A redução dos preços da eletricidade pode ocorrer à medida que cada unidade de energia elétrica economizada pode reduzir o volume de combustível, e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa e os custos de investimento para as usinas de energia fóssil e renovável e para a expansão da rede elétrica. Um estudo dos mercados da eletricidade na Alemanha demonstra que uma redução de 10% a 35% no consumo de eletricidade em 2035 diminuirá os custos de geração de eletricidade em U\$ 13,7 bilhões a U\$ 27,3 bilhões respectivamente (WÜNSCH *et al.*, 2014). Se os preços da energia caírem, novos impactos positivos sobre a competitividade são prováveis para a economia, levando ao aumento da produção econômica e ao maior rendimento disponível para os consumidores.

As medidas de eficiência energética quanto à balança comercial, podem impulsionar o aumento tanto nas exportações como nas importações. De acordo com Wunsch *et al.* (2014), o aumento da demanda por bens e serviços de eficiência energética cria um excedente no consumo que impulsiona o consumo privado, levando, inicialmente, ao aumento das

importações. Os impactos são positivos para o comércio: as importações de energia diminuem, enquanto as exportações de bens e serviços de eficiência energética aumentam.

Segundo Vine *et al.* (2003), uma barreira é qualquer fator que limita a promoção da eficiência energética na sociedade, e classificou as barreiras em políticas e de programa. As barreiras políticas caracterizam-se por limitações para atingir objetivos de interesse público por meio da eficiência energética; e barreiras de programa aquelas impostas a implementação de determinados programas de eficiência energética, principalmente refletindo a perspectiva do usuário final. Na Tabela 1, apresentam-se as barreiras verificadas no estudo.

Tabela 1. Barreiras à promoção da eficiência energética.

Barreiras Políticas	Barreiras aos Programas
Excesso de capacidade	Baixo custo da energia para os consumidores
Perspectiva de curto prazo	Falta de informação para os consumidores
Incentivos divididos entre fornecedores de energia	Custo da informação para consumidores e outros atores
Preços não transparentes e não rentáveis	Os consumidores não investem em eficiência energética em função de hábitos e costumes
Tarifas de importação	Falta de experiência
Falta de consciência dos decisores políticos	- Com resultados comprovados das ações de eficiência;
Falta de informação	- Incertezas de desempenho;
Instabilidade dos consumidores	- Relutância a novas tecnologias;
Falta de paradigma adequado para avaliar o valor da eficiência energética	- Medo na alteração da rotina
Separação do processo da política energética das políticas sociais e ambientais	Barreiras financeiras
Pouca experiência de mudança de mercado	- Capital de investimento limitado;
Falta de experiência	- Alto custo inicial.
Processo de configuração de preços	Indisponibilidade de produto ou serviço
	Barreiras institucionais
	Múltiplos tomadores de decisão
	Incentivos distribuídos

Fonte: Adaptado de Vine *et al.* (2003).

Apajalahti *et al.* (2015) citam duas barreiras principais, verificadas na União Europeia atualmente: a desagregação das operações das empresas de energia, o que dificulta o desenvolvimento de serviços quando a contribuição de várias unidades de negócios é necessária

e a desconfiança entre os usuários finais de energia, o que torna a lógica de negócios de modelos de contratos de economia de energia contraditórios.

Uma transição para energia sustentável é caracterizada por um sistema que usa menos energia em geral e é constituído por uma crescente proporção de energia renovável e eficiente. Este é um problema tecnológico, mas também é um problema comportamental, uma vez que requer a adoção de uma ampla gama de comportamentos energéticos sustentáveis.

Werff *et al.* (2018) classificam os comportamentos em relação ao uso de energia em comportamento de eficiência e comportamento de redução. Os comportamentos de eficiência referem-se a investimentos únicos que reduzem a energia necessária para manter atividades. Por exemplo, um consumidor residencial pode adotar painéis solares, isolar termicamente a casa ou substituir um refrigerador antigo por um mais eficiente. Os comportamentos de redução envolvem comportamentos repetidos ou hábitos que reduzem o uso doméstico de energia. Por exemplo, hábito de desligar a TV, após cada uso, em vez de serem deixados no modo de espera. Os comportamentos de eficiência, geralmente, produzem um efeito de longo prazo após um esforço focado, enquanto os comportamentos de redução requerem compromisso e gestão diária. Os comportamentos de eficiência geralmente levam a maiores economias de energia do que os comportamentos de redução.

Os resultados de uma pesquisa para avaliar o comportamento de consumidores residenciais em relação a mecanismos de incentivo à redução de consumo de energia são apresentados na Tabela 2, em que os consumidores foram distribuídos, aleatoriamente, em três grupos.

Tabela 2. Influência de incentivos financeiros para redução do consumo de energia residencial.

Grupo	Mecanismo	Energia Economizada (%)
Incentivo financeiro	Desconto de € 1,70 para cada 1 % de redução no consumo	5,9
Incentivo financeiro com comparação social	Mesmo desconto do grupo anterior, aliado a divulgação de resultados para comparação social	8,2
Grupo de controle	Não receberam informação	1,7

Fonte: Adaptado de Werff *et al.* (2018).

O incentivo financeiro gerou economia de energia, a qual foi potencializada quando associada com estratégias de comparação social dos resultados entre os consumidores. A comunicação das normas sociais pode ser efetiva porque as pessoas tendem a ser motivadas para adaptar seu comportamento para estarem de acordo com os outros.

Steg *et al.* (2018) indicam, em sua pesquisa, que o diagnóstico energético (*energy audit*) apresenta-se como estratégia mais eficaz que incentivos financeiros, a qual se mostrou efetiva para a promoção da economia de energia, pois as pessoas são mais propensas a atuar a partir de informações oriundas de profissionais e/ou empresas que conhecem ou confiam. Em seu trabalho, os autores identificam duas características de mudanças comportamentais, elasticidade e plasticidade. Elasticidade da mudança caracteriza-se quando a redução do consumo de energia e das emissões ocorrer se ocorrer a mudança; e a plasticidade do comportamento, em que a probabilidade de que o comportamento alvo seja adotado. Na Tabela 3, apresentam-se os dados de redução de emissões de quatro comportamentos de consumo eficiente de energia.

Tabela 3. Exemplos de comportamento para transição de consumo de energia sustentável.

Comportamento de consumo sustentável de energia	Elasticidade (Reduções Potenciais de Emissões com adoção 100%, em MtC)	Plasticidade (porcentagem estimada de adoção de programas efetivos, em MtC)
Isolação térmica de edificações	25,2	90
Temperatura do aquecedor de água	2,9	35
Chuveiros de baixo fluxo	1,4	80
Mudança de filtros de ar HVAC	8,7	30

Fonte: Adaptado de Steg *et al.*, (2018).

Comportamentos que podem ter grandes impactos se adotados podem não ser os melhores pontos de partida para a política porque são difíceis de mudar, mesmo quando o alvo de comportamentos com alta plasticidade e elasticidade são visados, podem ser desenvolvidas políticas e mecanismos que promovam e facilitam novas mudanças nos comportamentos necessários para aumentar a sustentabilidade dos sistemas de energia. Pode-se observar, na Tabela 3, nos dados de temperatura do aquecedor de água e os chuveiros de baixo fluxo, pois são medidas diretamente relacionadas ao conforto dos usuários. A adoção de tecnologia sustentável e eficiente em recursos, geralmente, resulta em maiores reduções no uso de energia e nas emissões de gases de efeito estufa do que as mudanças no comportamento diário dos usuários, embora os comportamentos diários possam parecer mais fáceis de mudar. Os movimentos em direção a uma tecnologia mais eficiente têm a vantagem de demonstrar aos consumidores que seus esforços são bastante efetivos, pelo menos quando as economias são visíveis para o adotante, embora os investimentos financeiros iniciais possam ser necessários, a adoção da tecnologia requer pouco esforço adicional ou inconveniente, uma vez que foi implementado.

Os esforços para incentivar comportamentos energéticos sustentáveis serão melhor sucedidos quando direcionem a fatores importantes de tais comportamentos. Isso inclui fatores individuais, como valores, identidade, crenças e características dos contextos em que os indivíduos atuam, como acesso a informações, circunstâncias financeiras e conexões de redes sociais. Compreender essas influências sobre o comportamento é essencial para a elaboração de programas e políticas de energia sustentável.

Atualmente observa-se uma consequência negativa da implementação de políticas de eficiência energética, é o fenômeno conhecido como Efeito Rebote, caracterizado pela utilização do benefício gerado pela eficiência para acessar mais bens e serviços em vez de alcançar a redução da demanda de energia. Como resultado, as reduções reais de energia são insuficientes para as estimativas realizadas durante a fase de desenvolvimento das políticas. O Efeito Rebote representa um problema quanto às políticas de eficiência energética, que foram implementadas com base em uma quantidade esperada de redução da demanda de energia, não fornecem os resultados esperados. Os tomadores de decisão precisam avaliar todos os possíveis efeitos de recuperação ao planejar políticas de eficiência energética para garantir que os objetivos sejam realistas, especialmente quando outros objetivos que são impulsionados pelo consumo reduzido de energia (como menores emissões) estão ligados à política (IEA, 2014).

Werff *et al.* (2018) destacam o Efeito Rebote, que com o incentivo aos comportamentos de eficiência e redução do uso de energia, provoca o aumento do consumo em outros usos finais de energia na residência. Por exemplo, ao adquirir novos equipamentos eficientes, tem-se a redução de custos com eletricidade e/ou outros combustíveis, resultando na utilização dessa receita extra para custear o uso de novos equipamentos ou outros bens ou serviços que consomem energia, que pode absorver parte da redução inicial no consumo de energia e emissões de dióxido de carbono (CO₂).

Um exemplo de Efeito Rebote pode ser verificado em um estudo da *Florida Power & Light*, em que o fornecimento de isolamento doméstico e aparelhos de ar condicionado eficientes não reduziu o uso de energia. As reduções de energia para o resfriamento doméstico em meses fora do verão foram 13% abaixo da estimativa de economia. Nos meses de verão, as economias de energia foram 1-2% menores do que a estimativa de economia potencial. Quanto ao aquecimento doméstico, as economias foram 8-12% menores do que a estimativa. Segundo Werff *et al.* (2018), as economias foram menores porque os consumidores aumentaram a temperatura em sua casa durante os meses de inverno e diminuíram a temperatura em seus domicílios nos meses de verão após a instalação de tecnologias eficientes em energia, as tecnologias eficientes em energia economizaram recursos dos participantes, que gastaram em

maior conforto, aumentando o uso de equipamentos de aquecimento e refrigeração. Portanto, os incentivos monetários, provavelmente, produzem um maior Efeito de Rebote do que as medidas não monetárias com o mesmo efeito comportamental.

Steg *et al* (2018) citam outro indicador de Efeito Rebote, refere-se ao caso que o incentivo não vale o esforço da economia de energia em residências. Os comportamentos de eficiência em unidades consumidoras residenciais diversas vezes possuem investimentos elevados, que são recuperados das economias de energia após um período de tempo relativamente longo. Por exemplo, o período de reembolso para painéis solares pode ser de oito anos ou mais. A pesquisa mostra que a maioria dos consumidores residenciais prefere o retorno imediato, em comparação com o recebimento da mesma quantidade no futuro. Como resultado desse desconto temporal, a poupança monetária obtida a partir de comportamentos de eficiência pode ser percebida que não vale a pena o esforço. Os benefícios obtidos a partir de comportamentos de redução, como reduzir a temperatura do aquecedor ou do tempo de utilização de chuveiros elétricos, podem ser percebidos como muito pequenos para justificar o aumento do desconforto. Dessa forma, os comportamentos de redução, também, podem ser percebidos como muito onerosos em comparação com os benefícios, devendo ser bem planejados para não resultar em efeito rebote.

Outra desvantagem da utilização de incentivos financeiros para redução do uso da energia, refere-se à diminuição da motivação intrínseca de os consumidores se envolverem em um comportamento energético mais sustentável, sem a necessidade direta de ganhos monetários. Ao destacar os benefícios monetários, isoladamente ou em combinação com os ambientais, as motivações ambientais dos consumidores e a vontade de inscrição foram reduzidas. Esses efeitos foram especialmente pronunciados entre os consumidores que se preocupam com o meio ambiente, ou seja, que são intrinsecamente motivados para se inscreverem no programa (STEG *et al.*, 2018).

2.2. Políticas e programas internacionais

A aplicação de políticas de eficiência energética em sistemas de distribuição aumentou na última década. Inicialmente, havia os programas que consistiam no estabelecimento de padrões de rendimento de usos finais de equipamentos, convergindo para as políticas baseadas nas obrigações das concessionárias de eletricidade de executar projetos de eficiência energética.

De acordo com IEA (2017), em 2005 havia, apenas, doze programas com ações de eficiência obrigatórias no mundo, sete estavam nos Estados Unidos, três na Europa, um no Brasil e outro na Coreia do Sul. Evoluindo para quarenta e cinco programas em todos os seis continentes em 2016, porém, concentrados em três regiões: vinte e cinco estão nos Estados Unidos, doze estão na Europa e quatro na Austrália. Outro indicador refere-se ao percentual do uso final de energia coberto por programas obrigatórios, o qual aumentou de 7,1% em 2005 para 18,3% em 2016.

Apajalahti *et al.* (2015) destacam a importância do papel das empresas de distribuição de eletricidade na difusão das medidas de GLD, enfatizando que as mudanças no setor, como a liberalização do mercado de energia na Europa, provocaram a redução nas ações de GLD, no entanto, a UE reagiu com a emissão da Diretiva (2006/32/CE) sobre a eficiência energética no uso final e serviços energéticos (ESD), e posteriormente com a publicação da Diretiva (2012/27/UE) sobre eficiência energética (EED), exigindo a criação de programas de obrigação de eficiência energética conforme destacado na Tabela 4.

Tabela 4. Diretivas da União Europeia sobre Eficiência Energética.

Ano	Decreto
2006	(2006/32/CE) Diretiva de Serviços Energéticos (ESD) incluiu obrigações para as empresas de energia cumprir determinados requisitos em termos de aconselhamento, comunicação, feedback e cobrança de energia. Além disso, a ESD também enfatizou a importância de se deslocar para os serviços de energia, em vez de aumentar as vendas de energia.
2012	(2012/27/EU) Diretiva de Eficiência Energética (EED) obriga os Estados membros a criar esquemas de obrigação de eficiência energética (ou comparáveis), ou seja, exigir que as empresas de energia economizem uma certa porcentagem do uso final de energia de seus clientes.

Fonte: Elaborada pelo autor.

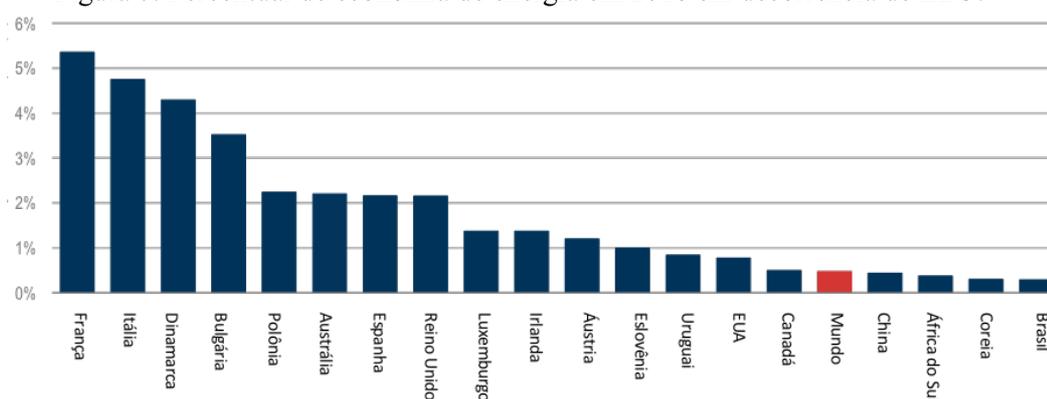
Apesar da forte motivação política e econômica, há um empenho das empresas de energia para desenvolver serviços de eficiência energética em mercados de energia liberalizados devido a demandas institucionais conflitantes, que decorrem de requisitos de política contraditórios e relações com clientes. O antigo papel da empresa de energia como fornecedor de bens públicos para as comunidades locais foi substituído pelos princípios do mercado de retornos crescentes e maximização de lucros. Além disso, a desagregação das operações da empresa de energia em unidades de negócios separadas levou a uma situação em

que o revendedor de eletricidade opera em um mercado competitivo de eletricidade, enquanto outras unidades de negócios, como a rede de distribuição, permaneceram nos monopólios locais (APAJALAHITI *et al.* 2015 ; VINE *et al.*, 2003).

Diversos países utilizam como instrumento político de promoção da eficiência energética as chamadas *Energy Efficiency Obligations* - EEO, que consistem em programas obrigatórios de investimentos em ações de eficiência energética. Mais de 50 EEO encontram-se operando no mundo, cerca de metade está localizada nos EUA, onde esse tipo de instrumento foi estabelecido, na Califórnia, após a crise de energia. Na Europa, a introdução da *Energy Efficiency Directive* em 2012 levou a um aumento do número de EEO, dentre os estados membro da UE, Áustria, Bulgária, Dinamarca, França, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Malta, Polónia, Eslovênia, Espanha, Reino Unido, têm EEO ativos, e outros três que deverão começar em breve (Croácia, Grécia e Letônia) e Holanda considerando sua introdução (ROSENOW *et al.*, 2017).

Na Figura 7 apresentam-se os resultados de economia de energia em 2016, decorrentes de EEO em operação desde 2005, com percentual do consumo final de energia de cada país. Destaque para a França, com 5,4 %, seguido pela Itália 4,8 %; o Brasil por meio do Programa de Eficiência Energética (abordado na seção 2.3.2), ocupa a última posição com percentual inferior a 0,5 % (IEA, 2017).

Figura 7. Percentual de economia de energia em 2016 em decorrência de EEO.



Fonte: Adaptado de IEA (2017).

Rosenow *et al.* (2017) analisaram os resultados da implementação de políticas obrigatórias de eficiência energética na União Europeia, considerando os custos e benefícios dos projetos. Deve-se ressaltar que os custos do programa de EEO na UE geralmente não são relatados pelas empresas de energia, a única exceção na Europa é o Reino Unido, que introduziu

relatórios obrigatórios de custos dos programas em 2013, que representam o custo para o público recuperado através das faturas de energia; custo do participante, que consistem nas contribuições dos beneficiários do programa; custo administrativo, custos dos órgãos públicos para a execução do programa. Nas Tabelas 5 e 6, apresenta-se a distribuição dos dados de custos.

Tabela 5. Comparação dos custos dos programas de EEO.

País	Período	Custos da Empresa de Energia (milhões €/ano)	Custos da Empresa de Energia (€/per capita/ano)
Reino Unido	2008-2012	1.052	16
Dinamarca	2015	185	33
França	2011-2013	390	6
Itália	2014	700	12
Áustria	2015	95	11

Fonte: Rosenow *et al.*, 2017.

Tabela 6. Custos dos participantes.

País	Participação do investimento privado
EUA	141 % dos custos do programa
Reino Unido	87 % dos custos do programa em 2002 a 2005 e 44 % em 2005 a 2008 (somente setor residencial, ~ 50 % famílias de baixa renda)
França	37 % dos custos do programa (EEOs operam em conjunto com descontos fiscais)
Dinamarca	200 % dos custos do programa (apenas setor industrial)

Fonte: Rosenow *et al.*, 2017.

Quanto aos resultados obtidos pelo programa, observa-se, na Tabela 7, a Itália em destaque, seguida pela França e Dinamarca.

Tabela 7. Impacto das EEOs no consumo de energia.

País	Período	Energia final economizada por ano (ktoe)	Redução da energia final consumida por ano	Setor
Reino Unido	2008-2012	237	0,5	Residencial
Dinamarca	2015	291	4,2	Todos
França	2011-2013	377	0,4	Todos
Itália	2014	500	0,4	Todos
Áustria	2015	136	0,9	Residencial e industrial

Fonte: Rosenow *et al.*, 2017.

White Certificate

O *White Certificate* (WhC) ou Certificado Branco, é um instrumento de política pública para o incentivo de ações de eficiência energética, emitidos por organismos de certificação independentes, confirmando as declarações dos agentes de mercado relativos à economia obtida a partir das ações de eficiência energética implementadas.

Definido como um documento contábil quantificando os ganhos energéticos obtidos. Deve ter forma de registro eletrônico em base de dados, identificado por número único, identificação do projeto e proprietário, período que ocorrerá a economia de energia e dados de medição e verificação do projeto. Esse instrumento é executado por um órgão ou entidade pública do setor de energia, o qual tem a função de definir os princípios básicos e regulação dos WhC's, como metas de economia de energia a serem atingidas no país; vetores de energia (exemplo: eletricidade, gás natural, petróleo, entre outras); critérios dos objetivos de redução do consumo de energia para os agentes obrigatórios; definição de penalidades quando as metas de economia não forem alcançadas (CALDEIRA, 2016).

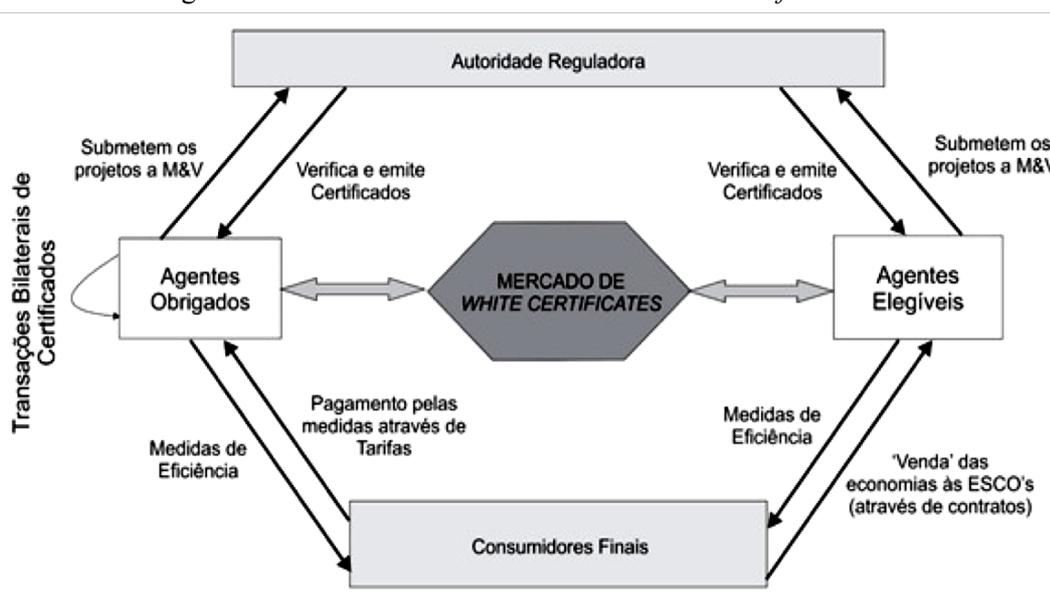
Quanto à adesão ao mercado de WhC's, eles podem ser obrigatórios ou voluntários. Na União Europeia, observa-se a execução como mecanismos de obrigações. Já nos Estados Unidos, o regime de mercado é prioritariamente voluntário (ROSENOW *et al.*, 2017).

A implantação de um WhC consiste na conversão do valor de energia economizada em WhC, por meio de uma metodologia certificada, tornando-o um título financeiro (certificado), correlacionando a quantidade de energia economizada a um volume proporcional de WhC's. A etapa final do processo consiste na negociação dos títulos de WhC's. O mecanismo prevê, nessa etapa, dois atores, os agentes obrigados a atingir metas de eficiência energética (lado da demanda) e os agentes elegíveis (lado da oferta). Estabelecendo-se a relação de procura e oferta, em que os agentes obrigados são os compradores pois necessitam dos certificados para atingir as metas de eficiência energética, pelo lado da oferta, há os agentes elegíveis, que são os vendedores, pois possuem WhC's em excesso (CALDEIRA, 2016).

Os agentes obrigados são os operadores obrigados por lei a possuírem WhC's para permitir a realização dos seus objetivos. Eles podem ser os produtores de energia, distribuidores de energia, comercializadores, fornecedores de energia ou de combustível e os próprios consumidores. Os agentes elegíveis são aqueles acreditados para desenvolver os projetos

elegíveis para obtenção de WhC's. Estes podem ser os agentes obrigados, os agentes não obrigados, as Empresas de Serviços Energéticos (ESCO's) e outras entidades comerciais ou empresariais que implementam projetos de eficiência energética, os consumidores, os intermediários de mercado (por exemplo os corretores de títulos de energia) ou, ainda, qualquer agente econômico com ou sem obrigação que deseje investir em tais títulos. Na Figura 8, apresenta-se um diagrama resumindo o funcionamento de uma estrutura de WhC's.

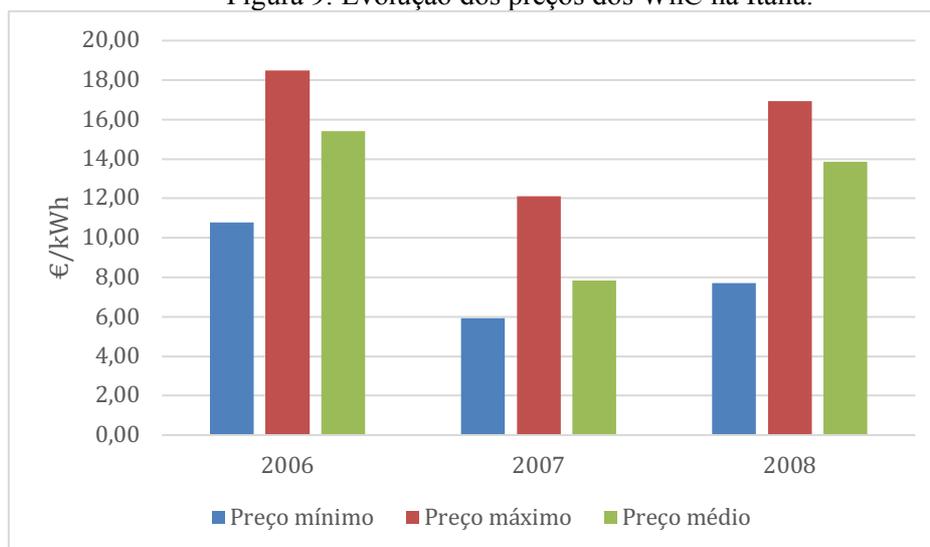
Figura 8. Funcionamento do mercado de *White Certificates*.



Fonte: Caldeira, 2016.

Alvarez *et al.* (2010) citam o caso da Itália, que utiliza os WhC desde 2005. As metas anuais por setor de energia estabelecidas consistem em uma eficiência energética de cerca de 2 % do consumo anual em 2009, levando em conta um crescimento da demanda de 1,5 % ao ano. Os WhC são de três tipos principais, dependendo da sua fonte: Tipo I (eficiência energética obtida no setor elétrico), Tipo II (eficiência energética obtida no setor de gás natural) e Tipo III (eficiência energética obtida em qualquer outro setor de energia). Foi criada uma bolsa de troca de mercado elétrica (GME) para permitir que todos os agentes troquem livremente os certificados brancos. Na Figura 9, apresentam-se os valores dos WhC do tipo I no período entre 2006 e 2008.

Figura 9. Evolução dos preços dos WhC na Itália.



Fonte: Adaptado de Alvarez *et al.* (2010).

Energy Efficiency Portfolio Standard (EEPS)

Nos EUA há um tipo particular de regulação, denominado *Energy Efficiency Portfolio Standard* (EEPS), podendo ser traduzido como portfólio regulatório para eficiência energética. Os EEPS consistem em um mecanismo que obriga ou incentiva as distribuidoras de eletricidade a atender um percentual de sua demanda por meio de medidas de eficiência energética. Embora não haja um padrão de portfólio federal, o congresso americano considerou essas políticas; por exemplo, o *American Clean Energy and Security Act 2009* (ACES) também chamada de *Waxman-Markey Bill*, proposta em 2009, prevê uma meta de eficiência energética e energia renovável de 20 % até 2020. Tanto os padrões de portfólio de eficiência energética quanto de energia renovável são ferramentas potenciais para que os EUA cumpram os tratados internacionais de clima pós Protocolo de Quioto (THOYRE, 2015).

A Califórnia é o estado que se destaca dos demais em relação as políticas de eficiência energética, cuja a crise energética entre 2000 e 2001 motivou vários avanços. As políticas são executadas pelas próprias concessionárias e reguladas pela *California Public Utilities Commission* – CPUC. Os projetos de eficiência energética são financiados com base em uma taxa de 1 % na fatura dos consumidores. As tarifas são horárias, estimulando os usuários a reduzir o consumo no horário de ponta. A aprovação dos projetos está sujeita à avaliação de índices de custo e eficiência. O regulamento da Califórnia adota o desacoplamento tarifário,

que consiste no ajuste tarifário de acordo com o desempenho da concessionária, cujo ajuste varia $\pm 3\%$ (ALVAREZ *et al.*, 2010).

Thoyre (2015) avaliou o impacto regulatório das EEPS nos EUA, utilizou os dados do estado de Carolina do Norte como referência em comparação com outros 35 estados americanos que possuem normas e regulamentos específicos para eficiência energética, executadas pelas concessionárias de distribuição de eletricidade. A principal constatação do estudo é que as leis atuais limitam a quantidade de eficiência energética incentivada por esse tipo de legislação, pois concentram e, frequentemente, limitam as mudanças na eficiência energética do lado da demanda.

De acordo com as estruturas regulatórias tradicionais, as concessionárias de eletricidade nos EUA, enfrentam desincentivos para promover ou implementar medidas de eficiência energética no curto e longo prazo. Em curto prazo, enfrentam o incentivo de produção, porque uma vez que os preços em estados regulados são estabelecidos por um órgão regulador, a concessionária perde receitas se as medidas de eficiência energética forem implementadas pelos clientes. Quanto ao longo prazo, os desincentivos para os investidores implementarem medidas de eficiência energética em função dos lucros para os acionistas das concessionárias de distribuição, decorrem de uma taxa de retorno sobre os investimentos, por exemplo em novas usinas ou infraestrutura de distribuição. Assim, experimenta-se um incentivo para expandir essa base tarifária, investindo em novas usinas e outras infraestruturas para atender a demanda crescente ou percebida pelos clientes. Esse efeito pode resultar em desincentivos de longo prazo para que os investidores incentivem seus clientes a economizar energia porque a demanda reduzida pode tornar difícil justificar os investimentos sobre os quais os lucros se baseiam (THOYRE, 2015).

De acordo com Alvarez *et al.* (2010), na Califórnia no período de 2002 a 2006, observou-se economia de 63 kWh por cada dólar investido, e em 2004 o programa resultou em economia de 1.869 GWh e redução de 384 MW de demanda no horário de ponta.

Eficiência Energética em Edificações

Estima-se que as edificações utilizem 32 % da energia consumida em todo o mundo, justificando a execução de políticas e programas de eficiência energética direcionados a edifícios residenciais e comerciais. No contexto internacional, as políticas para o setor compreendem incentivos ou obrigações com *retrofit* de eficiência de energia para edifícios existentes e políticas que exigem certificação e rotulagem para edificações. Na Tabela 8,

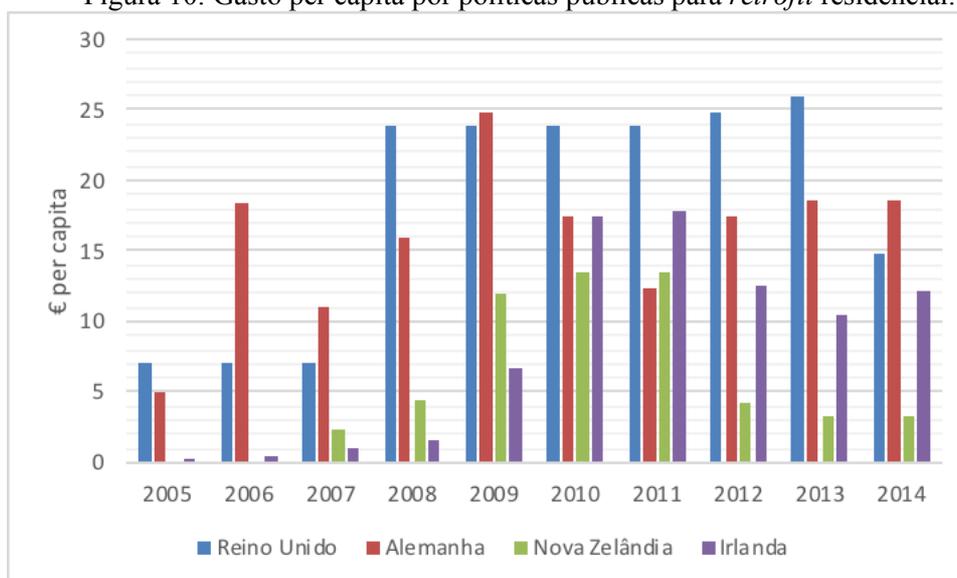
apresenta-se a relação de países com programas de certificação energética de edificações, obrigatórios ou voluntários, e a relação de países com políticas para o *retrofit* das edificações (KALLAKURI *et al.*, 2016).

Tabela 8. Relação de países com políticas e programas de certificação e *retrofit* de edificações.

País	Programas de certificação energética de edificações	Políticas para <i>retrofit</i> em edificações
França	Obrigatório	Código de renovação obrigatório; atualizações necessárias dentro de um prazo específico
Alemanha	Obrigatório	Código de renovação obrigatório; atualizações necessárias dentro de um prazo específico
Itália	Obrigatório	Código de renovação obrigatório
Holanda	Obrigatório	Código de renovação obrigatório
Polônia	Obrigatório	Código de renovação obrigatório
Espanha	Obrigatório	Código de renovação obrigatório
Turquia	Obrigatório	Código de renovação obrigatório
Austrália	Obrigatório	Códigos de renovação de estado abrangendo pequena parte da população
Reino Unido	Obrigatório	Código de renovação obrigatória, somente comercial
China	Obrigatório	Incentivo
Índia	Obrigatório	-
Rússia	Obrigatório	-
México	Voluntário	-
Canadá	Voluntário	Códigos de renovação por província abrangendo maioria da população
Taiwan	Voluntário	Código de renovação obrigatório
EUA	Voluntário	Códigos de renovação por estado abrangendo maioria da população
Japão	Voluntário	Código de renovação obrigatório; apresentação de planos de eficiência energética
Coréia do Sul	Voluntário	Código de renovação obrigatório, somente residencial
Tailândia	Voluntário	Incentivo
Brasil	Voluntário	Voluntário

Fonte: Adaptado de Kallakuri *et al.* (2016).

Kerr *et al.* (2017) apresentam os dados da distribuição *per capita* de investimentos em *retrofit* em residência através de políticas públicas. Na Figura 10, observa-se a Alemanha com maior taxa de investimento com 18,59 €/per capita, seguido pelo Reino Unido 14,84 €/per capita, Irlanda 10,43 €/per capita e o menor investimento *per capita* é na Nova Zelândia com 3,33 €/per capita.

Figura 10. Gasto per capita por políticas públicas para *retrofit* residencial.

Fonte: Adaptado de Kerr *et al.* (2017).

No Canadá há o programa *Federal Buildings Initiative* (FBI), em caráter voluntário que investe em projetos de eficiência energética através de *retrofit* em prédios pertencentes ou gerenciados pelo governo. Até 2014, mais de 80 projetos executados, US\$ 312 milhões em investimentos e resultando em US\$ 43 milhões em economia anual de custos de energia e redução de emissões de 235 ktCO₂eq (IEA, 2014).

Segundo Wells *et al.* (2018), o setor da construção está enfrentando desafios significativos em relação ao consumo de energia, mudanças climáticas, provocando o avanço da eficiência energética das edificações, bem como os limites para novos desenvolvimentos no ambiente construído. Um desses desenvolvimentos seria projetar edifícios residenciais e comerciais mais sustentáveis e readequar os edifícios existentes para alcançar a neutralidade de energia ou a posição de *Net Zero Energy Building* (NZEB). Na Tabela 9, apresenta-se a descrição da evolução das edificações com baixo consumo de energia, com a redução do consumo a cada geração.

Tabela 9. Evolução das edificações com consumo reduzido de energia.

Geração	Denominação	Características
1 ^a	<i>Green building</i>	-Início da certificação LEED; -Redução do consumo de energia; -Preocupação com o impacto das edificações ao meio ambiente.
2 ^a	<i>Nearly zero energy buildings</i> (nZEB)	-Redução do consumo de energia; -Apoio através de políticas (limitadas); -Preocupação com o impacto das edificações ao meio ambiente.
3 ^a	<i>Net zero energy buildings</i> (NZEB)	-Redução do consumo de energia; -Apoio através de políticas (limitadas); -Preocupação com o impacto das edificações ao meio ambiente.
4 ^a	Nova geração NZEB	-Consideração sobre estação de carregamento de veículos elétricos; -Apoio através de políticas consistentes; -Viabilidade econômica; -Considerações sobre mudanças climáticas; -Armazenamento local de energia; -Tecnologia inteligente; -Geração de energia incorporada (incluindo renováveis); -Redução do consumo de energia; -Preocupação com o impacto das edificações ao meio ambiente.
5 ^a	Geração futura	-Edificações regenerativas, criação de economia compartilhada; -Distritos <i>net zero energy</i> ; -Consideração sobre estação de carregamento de veículos elétricos; -Apoio através de políticas consistentes; -Viabilidade econômica; -Considerações sobre mudanças climáticas; -Armazenamento local de energia; -Tecnologia inteligente; -Geração de energia incorporada (incluindo renováveis); -Redução do consumo de energia; -Preocupação com o impacto das edificações ao meio ambiente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 10, apresenta-se a relação de países que possuem programas e políticas para os NZEB.

Tabela 10. Políticas públicas para os NZEB.

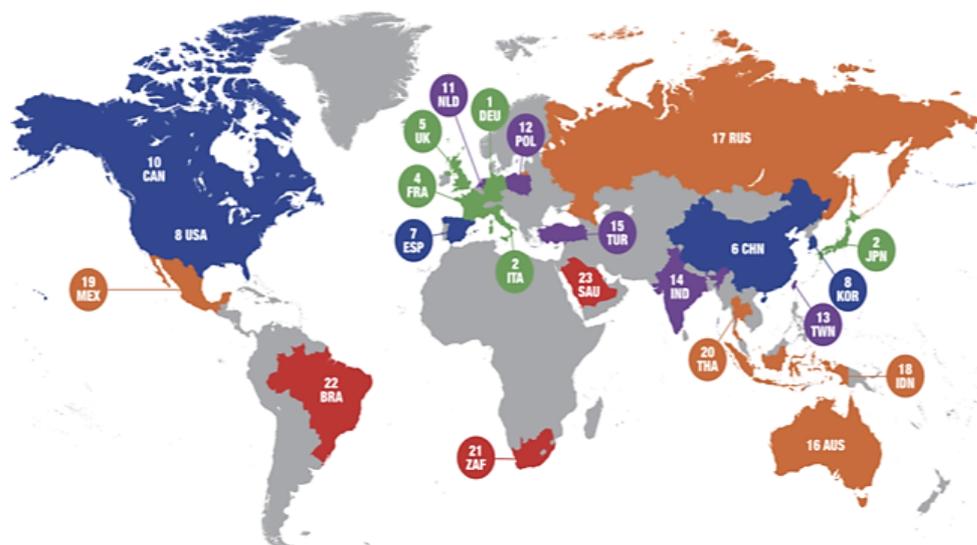
Países	Políticas específicas	Políticas energias renováveis	Metas redução de emissão
Canadá	Sim	Sim	Sim
Japão	Sim	Sim	Sim
EUA	Sim	Sim	Sim
União Europeia	nZEB	Sim	Sim
Austrália	Não	Sim	Sim
Nova Zelândia	Não	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Programas em destaque por País

A ACEEE publicou em 2016, um relatório com a análise do desempenho de diversos países em relação a políticas e programas de eficiência energética, estabelecendo uma classificação. Os três países melhor colocados são Alemanha, Japão e Itália, na Figura 11, apresenta-se o mapa com a distribuição dos países e sua colocação (KALLAKURI *et al.*, 2016).

Figura 11. Classificação dos países com ações para eficiência energética.



Fonte: Kallakuri *et al.* (2016).

Na Alemanha o planejamento para ações de eficiência energética é regido pelo NAPE - *Nationale Aktionsplan Energieeffizienz*, que pode ser traduzido como Plano Nacional de Ações para Eficiência Energética, estabelecido em 2014, baseado na Diretiva de Eficiência Energética 2012/27/EU. A meta exige uma redução do consumo de energia primária em 20 % até 2020 e em 50 % até 2050, conforme a Tabela 11 (SCHLOMANN *et al.*, 2015).

Tabela 11. Metas do programa para 2020 e total realizado em 2014.

Eficiência energética	2014	2020
Consumo de energia primária	-7 %	-20 %
Consumo bruto de eletricidade	-4,6 %	-10 %
Participação da produção de eletricidade por cogeração	17,3 %	25 %
Produtividade de energia	1,6 %	2,1 %
Demanda de calor em edificações	-12,4 %	20 %

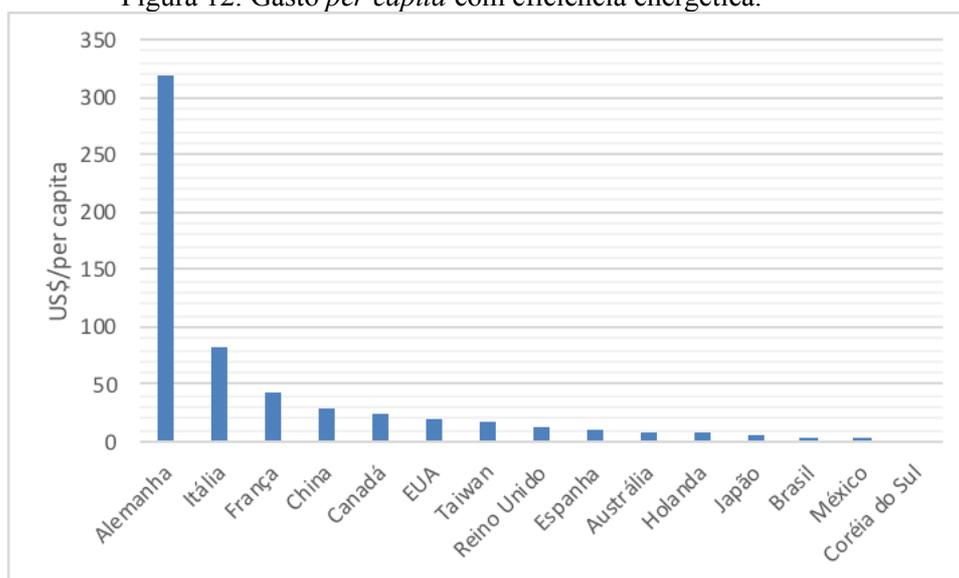
Fonte: Adaptado de Schlomann *et al.* (2015).

Bajay *et al.* (2018), enumeram diversas ações em destaque pelo NAPE:

- Edifícios residenciais e comerciais autossuficientes até 2050;
- Aumento do subsídio público para consultorias em eficiência energética em edificações para 60 % do valor do projeto;
- Subsídios e empréstimos com juros mais baixos para projetos de redução de emissões em edificações;
- Leilão de eficiência energética, programa denominado *STEP up competition*, para promover projetos em todos os setores;
- Destaque para apoio a empresas de pequeno e médio porte. Programas específicos para pequenas e médias indústrias, nos quais o governo atesta até 80 % da energia economizada;
- Juros bancário proporcional à economia de energia alcançada;
- Investimento em programas de gestão energética;
- Introdução de auditorias energéticas obrigatórias para grandes empresas, para identificar oportunidades de ganhos de eficiência energética.

Segundo Kallakuri *et al.* (2016), a Alemanha é o país que mais investe em eficiência energética, na Figura 12, apresenta-se a classificação com o valor *per capita* investido.

Figura 12. Gasto *per capita* com eficiência energética.



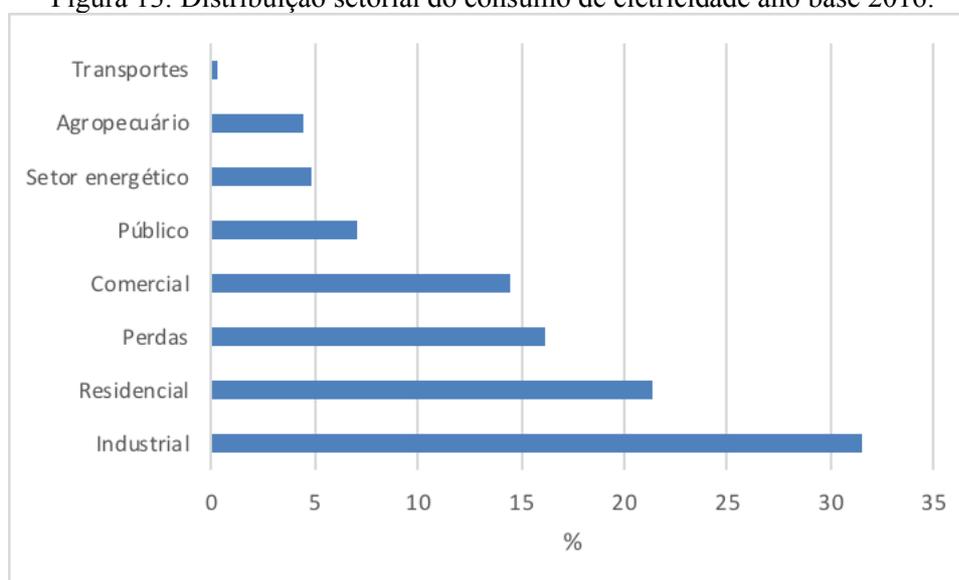
Fonte: Adaptado de Kallakuri *et al.* (2016).

O valor investido pela Alemanha é de US\$ 318,49, 390 % superior à Itália, segunda colocada na classificação, que investe US\$ 81,61, a média brasileira de investimento é de US\$ 3,29 *per capita*.

2.3. Políticas e programas no Brasil

No Brasil de acordo com o balanço energético nacional 2017, o valor de perdas de eletricidade foi de 16,1 % no ano de 2016, superior ao consumo do setor comercial, 14,4 %. O maior consumo de energia elétrica é do setor industrial responsável por 31,5 % do total, conforme a distribuição setorial apresentada na Figura 13.

Figura 13. Distribuição setorial do consumo de eletricidade ano base 2016.



Fonte: Adaptado de BEN (2017).

O Brasil possui dois grandes programas para o incentivo à utilização eficiente de energia elétrica, o PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica e o PEE – Programa de Eficiência Energética, executado pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica e regulado pela ANEEL, além de um histórico de políticas públicas envolvendo eficiência energética e conservação de energia (BRASIL, 2011).

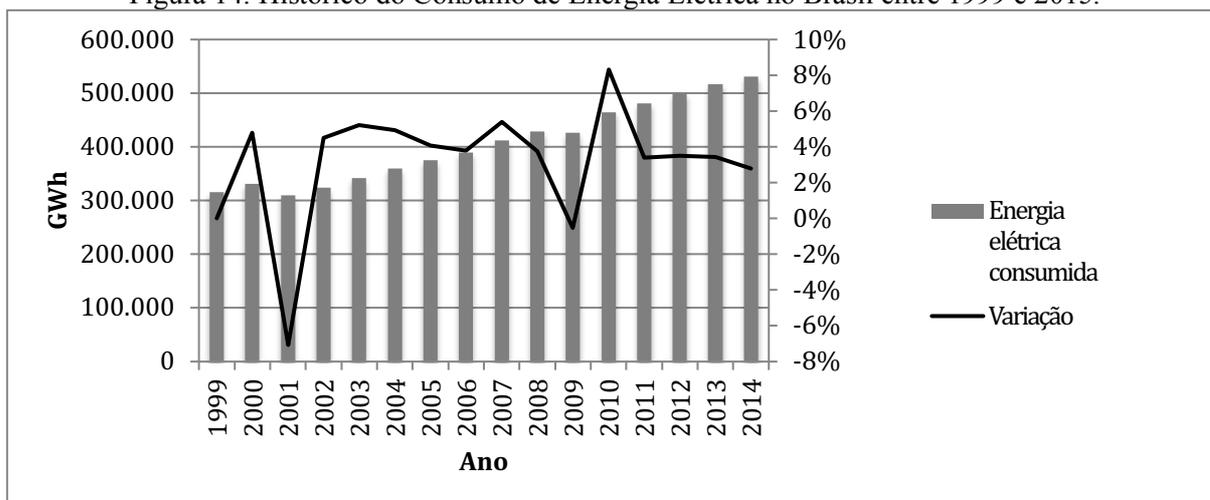
No início dos anos 2000, observou-se a intensificação das ações de eficiência energética, motivadas pela crise do setor elétrico brasileiro, que culminou com a Lei nº 9.991, de 24 de julho 2000. Esta apresenta três pontos importantes: (1) a obrigatoriedade de investimento de recursos oriundos do faturamento das concessionárias e permissionárias de

serviços públicos de distribuição de energia elétrica, (2) a forma de aplicação desses recursos, (3) e os prazos para os referidos investimentos (BRASIL, 2000). Essa lei foi um passo importante para o desenvolvimento do mercado de energia no Brasil, pois estabeleceu a aplicação de um montante mínimo de 0,75 % da receita das empresas em pesquisa e desenvolvimento (P&D) do setor elétrico e um montante mínimo de 0,25 % em um programa de eficiência energética no uso final (PEE). A lei constituiu ainda um Comitê Gestor, o qual definiu as diretrizes gerais e o plano anual de investimentos, bem como o acompanhamento da implementação das ações. Como fato positivo dessa lei, destaca-se o surgimento da cultura de projetos de P&D e eficiência energética nas concessionárias brasileiras, bem como a melhoria nos níveis eficiência energética das edificações, melhorias na eficiência dos sistemas motrizes, eletrodomésticos entre outros. O ponto negativo é que nem todos os montantes previstos foram investidos em projetos, devido às políticas de contenção de gastos do governo brasileiro, prejudicando a evolução do processo.

No entanto, a crise no setor elétrico agravou-se, resultando em medidas de racionamento no fornecimento de eletricidade, estabelecido por meio do Programa Emergencial de Redução no Consumo de Energia Elétrica – PERCEE, que vigorou de 1 de junho de 2001 a 28 de fevereiro de 2002, o programa determinava o cumprimento de metas de redução no consumo, de acordo com o tipo de consumidor e a média mensal de eletricidade consumida, sujeito a penalidades caso as metas não fossem cumpridas, as quais eram desde acréscimos de 50 a 200 % na tarifa, até a suspensão no fornecimento de energia elétrica da unidade consumidora, as metas de redução para consumidores residenciais eram de 20 %, e para demais consumidores de 15 a 25 % (BRASIL, 2001).

Na Figura 14, apresentam-se os dados de consumo de energia elétrica no Brasil de 1999 até 2015, bem como a variação no consumo para o mesmo período, observa-se, no gráfico, a redução de 7,07 % no consumo no ano de 2001, exemplificando o impacto do PERCEE (EPE, 2009; EPE, 2015).

Figura 14. Histórico do Consumo de Energia Elétrica no Brasil entre 1999 e 2015.



Fonte: Adaptado de EPE (2009) e EPE (2015).

A Lei 9.991/2000 vem sendo adaptada, principalmente, em relação aos percentuais de aplicação dos recursos e tipos de projetos prioritários (BRASIL, 2007; BRASIL, 2015). Outras leis e decretos surgiram no Brasil, tornando-se importante estratégia na formação de políticas públicas para a eficiência energética, na Tabela 12, enumeram-se as principais.

Tabela 12. Principais instrumentos brasileiros de regulação para a eficiência energética.

Ano	Lei/Resolução/Portaria
1996	Lei 9.427: cria a Agência Nacional de Energia Elétrica.
2000	Lei 9.991: dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.
2001	Lei 10.295: Denominada Lei da Eficiência Energética estabelece índices mínimos de eficiência de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, com base em indicadores técnicos pertinentes, que considerem a vida útil dos equipamentos, também estabelece que, um ano após a publicação dos níveis de eficiência energética, será estabelecido um programa de metas para sua progressiva evolução e obriga os fabricantes e importadores dos aparelhos a adotar as medidas necessárias para que sejam obedecidos os níveis máximos de consumo de energia e mínima de eficiência energética.
2002	Lei 10.438: esta lei basicamente instituiu o PROINFA- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, cujo principal objetivo foi aumentar a participação da energia elétrica produzida por Produtores Independentes Autônomos – PIA (através de fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa) no Sistema Elétrico Interligado Nacional.
2002	Lei 4.508: dispôs sobre a regulamentação específica que definiu os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no Brasil, em caráter obrigatório.
2008	Resolução 300: Altera critérios para aplicação de recursos em Programas de Eficiência Energética, com destaque para o direcionamento de 50% da obrigação legal de investimento em programas de eficiência energética em projetos voltados a comunidades de baixo poder aquisitivo.
2010	Portaria 372: aprova os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).
2010	Lei 12.212: cria a Tarifa Social, que estabelece descontos para consumidores classificados como baixa renda, e determina que as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica deverão aplicar, no mínimo, 60% dos recursos dos seus programas de eficiência para unidades consumidoras beneficiadas pela Tarifa Social.
2012	Resolução 482: estabelece as condições para a micro e mini geração de energia distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.
2012	Portaria 18: aprova os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R).
2013	Resolução 556: Aprova os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética, com destaque para o estabelecimento da Chamada Pública de projetos, e estabelece o investimento de 50% da obrigação legal de investimento nas duas classes de consumo com maior participação no mercado.
2016	Lei 13.280: alterou a Lei no 9.991, de 24 de julho de 2000, para disciplinar a aplicação dos recursos destinados a programas de eficiência energética. O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) poderá investir até 0,1% da receita operacional líquida das distribuidoras de energia elétrica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Encontra-se em discussão, no congresso brasileiro, o Projeto de Lei 1.917 de 2015 que prevê estratégias de mercado livre para o setor de distribuição, em que a unidade consumidora pode escolher a distribuidora que vai atendê-lo, podendo optar por concessionárias com menor preço de energia elétrica, cuja redução dos custos com a distribuição de eletricidade podem reduzir o valor pago ao usuário final.

2.3.1. Programa Nacional de Conservação de Energia

O Procel, instituído em 30 de dezembro de 1985 é um programa do governo brasileiro, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia - MME e executado pelas Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobras, destinado a promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. Os resultados obtidos pelas ações do programa contribuem para a eficiência dos bens e serviços, bem como possibilitam a postergação de investimentos no setor elétrico, reduzindo os impactos ambientais. Especificamente, entre as ações do Procel está a identificação e atribuição de selo de eficiência energética de equipamentos e edificações; elaboração e disseminação de informação qualificada em eficiência energética, seja por meio de ações educacionais ou da publicação de livros, *software* e manuais técnicos; apoio a prefeituras em programas de gestão de energia; melhorias na iluminação pública e sinalização semafórica; auxílio no planejamento e implantação de projetos que visem ao menor consumo de energia em indústrias e edificações, uso eficiente de eletricidade na área de saneamento. Entre 1986 e 2016, foram investidos pelo Procel, U\$ 862 milhões, que resultaram em uma economia de eletricidade de 107 TWh (PROCEL, 2017).

No ano de 2016, o total de recursos financeiros investidos no Procel totalizou U\$ 4,5 milhões, gerando os resultados da Tabela 13.

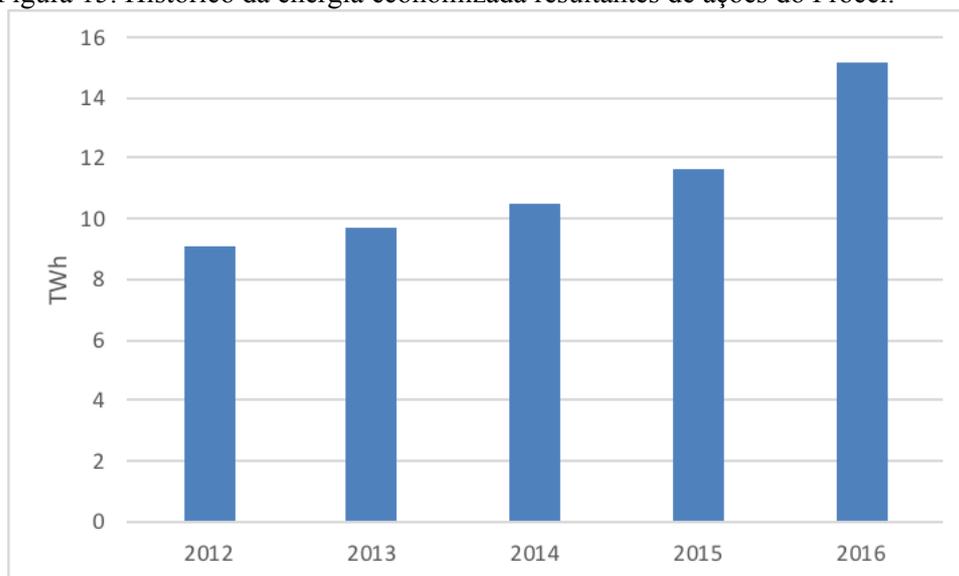
Tabela 13. Indicadores de resultados do Procel em 2016.

Indicador	Resultado
Energia economizada	15,15 TWh
Economia em relação ao consumo total de energia elétrica no Brasil	3,29 %
Economia em relação ao consumo residencial de energia elétrica no Brasil	11,40 %
Número de residências que poderiam ser atendidas pela energia economizada durante um ano	7,8 milhões
Emissões de CO ₂ equivalente evitadas	1,238 MtCO ₂ eq

Fonte: Adaptado de Procel (2017).

De acordo com Procel (2017), houve um aumento de 22,9 % da energia economizada em 2016 relação ao ano 2015, e 39,93 % em relação a 2012, conforme a Figura 15.

Figura 15. Histórico da energia economizada resultantes de ações do Procel.



Fonte: Adaptado de Procel (2017).

2.3.2. Programa de Eficiência Energética

Tem-se como consequência da lei 9.991/2000 o Programa de Eficiência Energética, o qual objetiva promover o uso eficiente da energia elétrica em todos os setores da economia por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. É alinhado com o planejamento energético brasileiro, estando presente no Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), que o considera como a principal fonte de recursos para a inserção da eficiência energética no sistema de distribuição de eletricidade brasileiro (BRASIL, 2011).

Por meio dele, busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada, promovendo a transformação do mercado de eficiência energética, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica, cujo regulamento estabelece que as concessionárias de serviços públicos de distribuição, transmissão ou geração de energia elétrica, as permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica e as autorizadas à produção independente de energia elétrica, excluindo-se aquelas que geram energia, exclusivamente, a partir de instalações eólica, solar, biomassa, cogeração qualificada e pequenas centrais hidrelétricas, devem aplicar, anualmente, um percentual mínimo de sua Receita Operacional Líquida (ROL) em projetos de pesquisa e desenvolvimento do setor de energia elétrica. Tendo registrado nos últimos dezoito anos, o total 1,52 bilhão de dólares de investimento declarados pelas

concessionárias, prevendo como resultados 9,48 TWh/ano de economia de energia e 2,95 GW de redução de demanda no horário de ponta (ANEEL, 2016).

O PEE é obrigatório para distribuidoras com mercado superior a 1.000 GWh/ano e, pelo menos, 50 % dos recursos devem ser aplicados em unidades consumidoras das duas classes de consumo com maior participação no mercado. Em unidades consumidoras com fins lucrativos, os projetos devem ser realizados por meio de contratos de desempenho energético, com reembolso do valor investido no projeto, entretanto, em relação aos projetos em unidades consumidoras sem fins lucrativos os investimentos são não reembolsáveis, uma das vantagens em relação a outros financiamentos, não há cobrança de juros, apenas correção monetária, além disso, os consumidores devem reembolsar apenas os custos de implantação. O principal objetivo do contrato de desempenho energético é evitar a transferência de recursos públicos para unidades consumidoras com fins lucrativos, objetiva também reduzir a desconfiança em relação ao sucesso da ação de eficiência energética, uma vez que o pagamento está condicionado ao sucesso da medida implantada. A ANEEL adota como metodologia de medição e verificação o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance da EVO (ANEEL, 2016).

As classes de consumo consideradas para o programa são: rural, industrial, comercial e serviços, residencial, serviço público, poder público e iluminação pública. Os projetos para atender a essas classes devem ser contratados por meio de uma chamada pública, que é um mecanismo para implantação de ações de eficiência energética, em que a distribuidora emite um edital convocando para a apresentação de projetos de eficiência energética, concorrendo em regime de leilão de qualidade e preço. O objetivo principal da chamada pública de projetos é motivar a participação da sociedade em geral, com maior diversidade de projetos e incentivo a criação de um mercado de eficiência energética, além disso tornando o processo decisório de escolha dos projetos e consumidores beneficiados pelo PEE mais transparente e democrático, promovendo maior participação da sociedade (ANEEL, 2016).

O principal critério de escolha dentre os projetos participantes da chamada pública baseia-se na relação custo benefício (RCB) dos projetos (equação (1)), considera-se como benefícios a valoração da energia economizada e redução da demanda no horário de ponta durante a vida útil do projeto, e os custos são todos os investimentos feitos para a realização do projeto. Como regra geral um projeto será aprovado se atingir RCB menor ou igual a 0,8 (ANEEL, 2016).

A relação custo benefício é representada pela equação (1):

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T} \quad (1)$$

CA_T constitui o custo anualizado total, dado em \$/ano; e BA_T é o benefício anualizado total, também em \$/ano. A equação (2) é utilizada para determinar o custo anualizado total.

$$CA_T = \sum_n CA_n \quad (2)$$

A variável CA_n corresponde ao custo anualizado de cada equipamento e serviços, dado em \$/ano, e é determinado por (3).

$$CA_n = CE_n \cdot \frac{CT}{CE_T} \cdot FRC_u \quad (3)$$

CE_n é o custo de cada equipamento, em \$; CT é o custo total do projeto; FRC_u é o fator de recuperação do capital para u anos, 1/ano; u representa a vida útil dos equipamentos, em anos; e em (4), tem-se a equação do custo total em equipamentos, dado em \$.

$$CE_T = \sum_n CE_n \quad (4)$$

O Fator de recuperação do capital é dado por (5):

$$FRC_u = \frac{i(1+i)^u}{(1+i)^u - 1} \quad (5)$$

Em que i é a taxa de desconto considerada, em 1/ano; e u , a vida útil dos equipamentos.

Os benefícios anualizados são totalizados pela equação (6):

$$BA_T = (EE \cdot CEE) + (RDP \cdot CED) \quad (6)$$

EE é a energia anual economizada, MWh/ano; RDP é a demanda evitada na ponta, kW.ano; CEE é o custo unitário da energia em \$/MWh, dado por (7); e CED o custo unitário evitado da demanda, em \$/kW.ano, conforme (8).

$$CEE = \frac{(C_p \cdot LE_p) + (C_{fp} \cdot LE_{fp})}{LE_p + LE_{fp}} \quad (7)$$

C_p é o custo unitário de energia no horário de ponta na bandeira verde, em \$/MWh; C_{fp} é o custo unitário de energia no horário fora de ponta na bandeira verde, em \$/MWh; LE_p é uma constante de perda de energia no posto de ponta, considerando-se 1 kW de perda de demanda no horário de ponta; LE_{fp} é uma constante de perda de energia no posto fora de ponta, considerando 1 kW de perda de demanda no horário fora de ponta.

$$CED = (12 C_1 \cdot h_p \cdot F_c \cdot 10^3) + (12 C_2 \cdot h_{fp} \cdot F_c \cdot 10^3 \cdot LP) \quad (8)$$

Em que C_1 é o custo unitário do uso do sistema de distribuição no horário de ponta, dado em \$/MWh; h_p é o número de horas da ponta em um mês, considerando-se somente os dias úteis; F_c é o fator de carga do segmento elétrico imediatamente ao montante daquele considerado ou que sofreu a intervenção; C_2 é o custo unitário do uso do sistema de distribuição no horário fora de ponta, dado em \$/MWh; h_{fp} é o número de horas fora da ponta em um mês; LP é a constante de perda de demanda no posto fora de ponta, considerando 1 kW de perda de demanda no horário de ponta.

Para a análise da viabilidade de projetos de eficiência energética, utiliza-se o RCB calculado sob a ótica da sociedade e do ponto de vista do PEE, em projetos com geração de energia com fonte incentivada este será avaliado sob a ótica do consumidor. Caso o projeto tenha mais de um uso final de energia, cada um desses usos deverá ter um valor de RCB calculado, e o valor global da RCB do projeto será calculado por meio das somas dos custos e benefícios.

No Brasil, são incentivadas as fontes com base nas seguintes energias renováveis: hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. O PEE prevê a utilização de geração de energia com tais fontes até 1 MW, associadas a ações de eficiência energética. A viabilidade é considerada a partir do ponto de vista do consumidor, ou seja, serão quantificados os benefícios (energia economizada e demanda na ponta evitada) valorados pelo preço pago pelo consumidor.

Para projetos com fontes incentivadas, os que apresentarem RCB inferior a 0,8 estão automaticamente aprovados, entre 0,8 e 1 devem ser encaminhados para análise da ANEEL, sendo que 1 é o valor máximo de RCB aceito.

O RCB total do projeto com fontes incentivadas deve obedecer a seguinte equação:

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_{CG} + BA_{EE}} \quad (9)$$

RCB-Relação custo benefício;

CA_T -Custo anualizado total; \$/ano;

BA_{CG} -Benefício anual da central geradora; \$/ano;

BA_{EE} -Benefício anual das ações de eficiência energética; \$/ano.

2.4. Considerações finais

A eficiência energética no setor de distribuição de energia elétrica foi abordada, apresentando a contextualização das ações no sistema, caracterizado pela necessidade de energia renovável, segura e eficiente, em um ambiente com avanço tecnológico impulsionado pela expansão das redes de distribuição inteligentes, assim como o aumento da geração distribuída, alterando a papel do consumidor, constituindo agora uma nova unidade de geração de energia. Nesse cenário surgem novos agentes de mercado e novas estratégias de formação de preço da energia elétrica, aumentando a relevância da eficiência energética. Os múltiplos benefícios da eficiência energética foram apresentados, com destaque para a sua influência no PIB, preço da energia e geração de empregos. Diversas barreiras ao sucesso na implantação de políticas também foram identificadas, assim como a classificação dos comportamentos dos usuários, necessária para a redução do efeito rebote, e conseqüentemente o aumento do impacto das ações de eficiência energética.

As políticas e programas de eficiência energética no setor de distribuição de vários países foram apresentadas, assim como os programas brasileiros. O surgimento dos programas baseados na obrigação com a eficiência energética foi abordado, com destaque para as diretivas da União Europeia, e como exemplo cita-se a França que alcançou uma economia de energia de 5,4% em decorrência de projetos EEO. Apresentou-se os mecanismos, como *White certificates* e EEPS, bastante difundidos na última década. A importância da eficiência energética em edificações como estratégia internacional foi abordada, bem como a evolução para as edificações com consumo médio nulo da energia da rede de distribuição. A Alemanha destaca-se internacionalmente, como o país que mais investe em eficiência energética no mundo.

O caso brasileiro foi apresentado, destacando o Procel e os resultados dos trinta anos de atuação, com investimento de US\$ 862 milhões proporcionando 102 TWh de energia economizada. Evidenciou-se quase duas décadas de legislação específica para a eficiência energética no Brasil e o Programa de Eficiência Energética regulado pela ANEEL e executado pelas concessionárias de energia elétrica foi apresentado, bem como, o detalhamento do modelo do cálculo da relação custo benefício.

No capítulo 3, apresenta-se a metodologia proposta para a análise e classificação dos dados do Programa de Eficiência Energética.

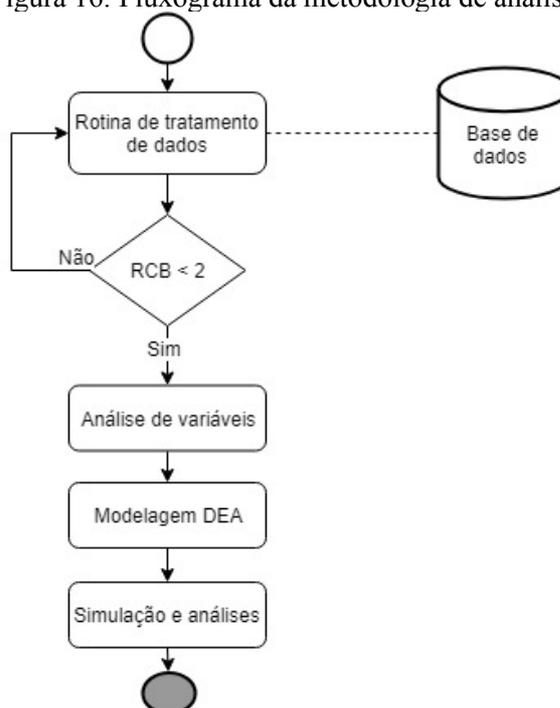
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA PARA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O Programa de Eficiência Energética apresentado no capítulo anterior, é considerado a maior fonte de recursos para aplicação de ações de eficiência energética nos sistemas de distribuição de energia elétrica do Brasil. Esse protagonismo motiva novos estudos para a ampliação dos seus impactos. Nesse sentido, uma metodologia para análise e classificação de projetos de eficiência energética é apresentada. O método inicia com a rotina para tratamento da base de dados de 1.704 projetos, seguindo com a determinação das variáveis de trabalho, e desenvolvimento de um modelo para determinação de indicadores de eficiência e posterior classificação dos projetos.

3.1. Considerações iniciais

Desenvolveu-se uma metodologia para tratamento da base de dados, analisar, classificar e quantificar as variáveis de projetos do PEE, modelar o problema e finalizando com a determinação dos projetos de melhor desempenho, por meio de indicadores que permitem a melhor tomada de decisão. No fluxograma da Figura 16, são apresentadas as etapas da metodologia.

Figura 16. Fluxograma da metodologia de análise.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir apresenta-se as etapas detalhadas do método, composto de tratamento de rotina e filtragem de dados, análise das variáveis, modelagem análise por envoltória dos dados, simulação e análise.

3.2. Tratamento e filtragem de dados

Nesta etapa, foram desenvolvidas rotinas para o tratamento e seleção dos dados a serem analisados, consistindo na filtragem de dados falsos e inconsistentes, resultantes da falha no processamento de dados por concessionárias de energia. Inicialmente, apenas os projetos com todos os dados das variáveis preenchidas foram selecionados e, posteriormente, o RCB foi adotado com um parâmetro inferior a 2, acima desse valor os dados dos projetos não serão considerados (representa o dobro de custos em relação aos benefícios obtidos), devido ao limite de aceitação do projeto pela ANEEL ser igual a 1.

Base de dados

Para analisar o PEE, utilizou-se um banco de dados relativo ao período de janeiro de 2008 a março de 2016, que inclui 1.704 projetos encaminhados à ANEEL pelas concessionárias de energia elétrica com informações sobre os projetos a serem implementados. Os projetos são classificados em 14 tipologias e 7 em usos finais, e o banco de dados é composto por cinco variáveis: energia economizada, redução da demanda do horário de ponta, custo total do projeto, custo da energia economizada e RCB (a descrição das tipologias esta no Apêndice B).

3.3. Análise das variáveis

A análise das características presentes num conjunto de dados permite a descoberta de padrões e tendências que podem fornecer informações valiosas que ajudam a compreender o processo que gera os dados. Muitas dessas características podem ser obtidas por meio da aplicação de equações estatísticas simples. Outras podem ser observadas por meio do uso de técnicas de simulação (GAMA *et al.*, 2015).

Uma forma de explorar um conjunto de dados consiste em extrair estatísticas descritivas, que resume de forma quantitativa suas principais características. As medidas de centralidade definem pontos de referência, para os dados numéricos, a medida mais utilizada é a média, pois é um bom indicador do valor central. No método apresentado os dados foram tratados retirando-se os *outliers* (valores muito diferentes dos demais valores observados para a mesma variável analisada), tornando a média um bom indicador para análise dos projetos.

Essa etapa consiste em consolidar os dados, classificados por tipologia e uso final de energia e análise subsequente. O valor total dos projetos, a economia de energia, a redução da demanda no horário de ponta, o custo total dos projetos, o custo da economia de energia e a relação custo-benefício são apresentados para cada tipologia. A análise das variáveis citadas em relação ao número de projetos foi realizada por tipologia, bem como considerando a classificação do uso final de energia.

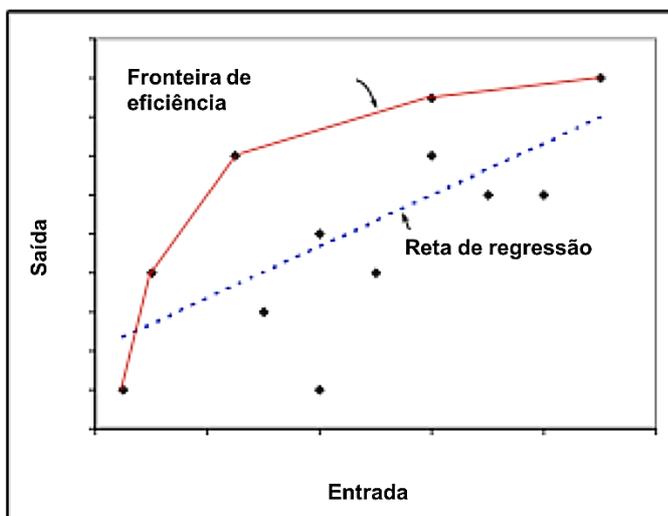
Após o tratamento de dados, o número de projetos considerados para análise foi reduzido para 1.677, dessa amostra, o investimento total durante esse período considerado foi de U\$ 1,49 bilhão, resultando em uma economia de energia de 4,29 TWh/ano e uma redução de 1,33 GW na demanda durante o horário de ponta. Os resultados detalhados do tratamento das variáveis e análise dos projetos, estão descritos no capítulo quatro, seção 4.1.

3.4. Modelagem utilizando o método da análise por envoltória dos dados

Um modelo foi desenvolvido usando o método de análise por envoltória de dados (DEA), considerando o problema como uma caixa preta, dada a sua função de produção desconhecida, mas com suas entradas e saídas bem definidas. Inicialmente, foi considerada a minimização de entrada e maximização de resultados. A metodologia escolhida para modelar o problema leva em consideração as características do banco de dados disponível para identificar os tipos de medidas de eficiência energética que permitem os melhores resultados no programa. A metodologia consiste em determinar o limite de eficiência em que as tipologias mais eficientes de projetos (e conseqüentemente as medidas de eficiência energética) definem esse limite, composto pelas tipologias com a melhor relação entrada-saída. Todas as outras tipologias fora da curva de limite são classificadas como uma função de sua distância à curva.

De acordo com Colin (2017), o DEA é um método não-paramétrico que usa programação linear baseada em partes para calcular as unidades mais eficientes em um determinado conjunto de unidades de tomada de decisão (DMU). As DMU que formam a fronteira também incluem aquelas consideradas menos eficientes. Em contraste com as aproximações paramétricas, que otimizam um plano de regressão a partir das observações, DEA otimiza cada observação individual com o objetivo de calcular uma fronteira de eficiência, determinada pelas unidades que são Pareto-eficientes (Mello *et al*, 2005). Uma unidade é Pareto-eficiente se, e somente se, ela não consegue melhorar alguma de suas características sem piorar as demais, conforme exemplo da Figura 17.

Figura 17. Comparação entre DEA e regressão linear.



Fonte: Mello *et al.* (2005).

Cada unidade é comparada com uma combinação linear de unidades que produzem pelo menos uma saída como a unidade ineficiente com a menor quantidade possível de entrada. A eficiência operacional é calculada com uma pontuação de 0 a 1, na qual 1 é dada às unidades mais eficientes que formam a curva de limite, a serem determinadas de acordo com as equações 10 e 11 (PINHEIRO, 2012; COLIN, 2017).

$$MaxE_0 = \frac{\sum_r v_r z_{r_0}}{\sum_i u_i x_{i_0}} \quad (10)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_r v_r z_{rj}}{\sum_i u_i x_{ij}} \leq 1; j = 1 \dots n \quad (11)$$

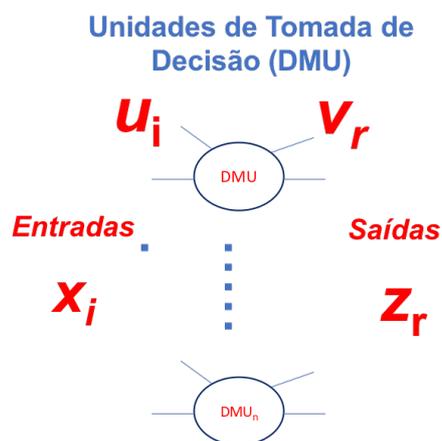
$$v_r, u_i \geq 0; r = 1 \dots s; i = 1 \dots m.$$

A equação (10) corresponde à função objetivo, em que E representa o índice de eficiência, dado pela soma ponderada das saídas e dividido pela soma ponderada das entradas.

Na equação (11), as restrições para otimizar a função objetivo. O v_r representa os pesos atribuídos às saídas r ; u_i os pesos atribuídos às entradas i ; z_{rj} representa a quantidade observada de saída r para a unidade j ; x_{ij} a quantidade observada de entrada i para a unidade j ; n é o número

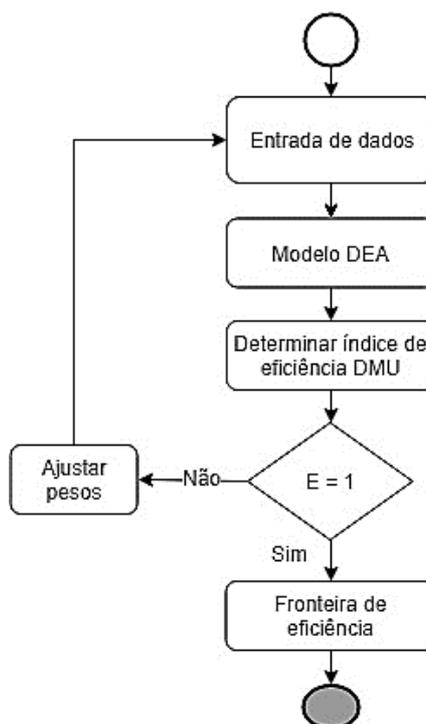
total de unidades em análise; s representa o total de resultados; m as entradas totais. Na Figura 18 apresenta-se um diagrama representando a relação entre as variáveis do modelo com as unidades de tomada de decisão.

Figura 18. Representação das unidades de tomada de decisão.



O fluxograma da Figura 19 ilustra as etapas da rotina que compõe o método DEA, até a formação da fronteira de eficiência.

Figura 19. Fluxograma do método DEA.



Esse método tem dois modelos em relação aos retornos a escala: o modelo constante de retorno à escala (CRS), que, por sua própria denominação, não altera os retornos a escala, e o modelo variável de retorno a escala (VRS), que considera situações de eficiência de produção com variação de escala e não assume proporcionalidade entre entradas e saídas (PINHEIRO, 2012).

Neste trabalho, foi selecionado o modelo VRS, no qual a variável pode estar correlacionada; daí os resultados mostraram as melhores tipologias quando se considera um número maior de variáveis. As restrições DEA podem ser configuradas para as características específicas do problema, referenciando o modelo em relação à minimização de entradas ou maximização das saídas (ALVAREZ *et al.*, 2010; PINHEIRO, 2012). A função objetivo em questão pode ser avaliada pelas duas opções, dessa forma, os modelos referenciados a entrada e saída serão simulados, de acordo com as equações 12 e 13.

$$Max E_0 = \sum_{r=1}^s v_r \cdot z_{r_0}$$

Sujeito a:

$$\sum_{r=1}^s v_r \cdot z_{r_0} - \sum_{i=1}^m u_i \cdot x_{i_0} \leq 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m u_i \cdot x_{i_0} = 1$$

$$u_i, v_r \geq 0$$

A equação 13 refere-se ao modelo dual orientado à entrada.

$$Min E_0$$

Sujeito a

$$E_0 x_{i_0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot x_{ij} \geq 0; i = 1 \dots m \quad (13)$$

$$-z_{r_0} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot z_{rj} \geq 0; r = 1 \dots s$$

$$\lambda_j \geq 0; j = 1 \dots n$$

Os valores obtidos para E , atribuem um valor de eficiência para cada DMU_j . As DMU com $E < 1$ são classificadas como ineficientes, se $E = 1$, as DMU compõe o limite de eficiência.

A variável λ_j é uma constante de convexidade, que representa os pesos atribuídos às saídas e entradas, garantindo a convexidade da fronteira de eficiência. A variável λ_j é utilizada para análise de *benchmarking*, identificando quais DMU eficientes podem ser consideradas como referência para quais DMU ineficientes. Um λ_j igual a zero significa que a DMU correspondente não é *benchmark* para a DMU em análise. Quanto maior for o λ_j , maior a importância da DMU correspondente como referência para a DMU ineficiente.

3.4.1. Escolha das variáveis e unidades de tomada de decisão

A metodologia escolhida para modelar o problema leva em consideração as características do banco de dados disponível para identificar os tipos de medidas de eficiência energética que permitem os melhores resultados no programa. Optou-se pelo modelo orientado a entrada, em função do PEE determinar a meta do programa como um percentual da receita operacional líquida, conseqüentemente limitando o custo total dos projetos.

Adotou-se as recomendações de Mello *et al* (2005) e Colin (2017) quanto a modelagem, em relação as características de homogeneidade dos dados e quantidade de entradas e saídas (discriminação).

Em relação a homogeneidade, Mello *et al* (2005), sugere que o conjunto de DMU adotado deve ser realizar as mesmas tarefas, com os mesmos objetivos, trabalhar nas mesmas condições de mercado e variando apenas em intensidade. Quanto a discriminação, devemos, assim, procurar um ponto de equilíbrio na quantidade de variáveis e DMU escolhidas, visando aumentar o poder discriminatório do método, um dos critérios indica que o número de DMU deve ser pelo menos o dobro da soma dos entradas e saídas.

O modelo desenvolvido mostra o melhor tipo de projeto a ser executado pelas empresas de distribuição de eletricidade, levando-se em consideração quatro aspectos principais: o menor custo de economia de energia, a maior economia de energia e a maior redução da demanda no horário de ponta. O custo da energia economizada por projeto foi selecionado como entrada. A energia economizada por projeto e redução de demanda na hora de ponta por projeto como saídas e as tipologias do projeto como unidades de tomada de decisão, de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14. Variáveis usadas no modelo DEA.

Entrada (X)	Saída (Z)	Unidade de tomada de decisão (DMU) E ₀
Custo total da energia economizada por projeto	-Energia economizada por projeto -Redução de demanda de ponta por projeto	Baixa renda
		Poder público
		Comércio e serviços
		Serviço público
		Residencial
		Industrial
		Rural
		Aquecimento solar
		Projeto piloto
		Cogeração
		Iluminação pública
		Lado da oferta

Fonte: Elaborada pelo autor.

A função objetivo foi modelada considerando-se 1 entrada e 2 saídas, além de 12 unidades de tomada de decisão. De acordo com as variáveis disponíveis, as quantidades mais significativas para a representação do problema foram avaliadas. Optou-se por correlacionar os dados disponíveis com o número de projetos executados em cada tipologia, de acordo com a variedade de tamanho do projeto, determinando os valores médios de cada variável, apresentados no capítulo anterior.

- Entrada: custo total da energia economizada - O custo da energia economizada por tipologia é a relação entre o investimento total realizado e as economias de energia, apresentados no capítulo 4, na Tabela 16 e na Figura 24.
- Saída 1: energia economizada por projeto - é a relação entre energia total economizada por tipologia e a quantidade de projetos, apresentados no capítulo 4, na Tabela 16 e Figura 22.
- Saída 2: redução da demanda no horário de ponta por projeto - é a relação entre a redução total da demanda no horário de ponta por tipologia e a quantidade de projetos, apresentados no capítulo 4, na Tabela 16 e Figura 23.

3.5. Simulação e Análise

A partir da análise dos projetos e tratamento dos dados, utilizou-se o modelo elaborado para simulação e classificação das unidades de tomada de decisão, e posterior definição da fronteira de eficiência. As melhores tipologias do projeto serão identificadas, bem como as tipologias que não alcançam a fronteira de eficiência serão avaliadas e os ganhos necessários para que elas atinjam a fronteira serão determinados.

Para realizar as simulações, utilizou-se o *software* Matlab para implementação do algoritmo, incluindo rotina para leitura de arquivos da base de dados tipo csv.

Para a discussão dos resultados e validação da metodologia, um estudo de caso foi elaborado a partir de um projeto real executado para o PEE, com a verificação do atendimento a fronteira de eficiência e adequação dos alvos. A análise de viabilidade econômica será realizada comparando os resultados obtidos com modelos de valor presente líquido e taxa interna de retorno. Para simulação do modelo PEE utilizou-se *software* Matlab e Microsoft excel, para a comparação dos modelos foi implementado no *software* Retscreen através de três atividades: desenvolvimento do modelo de energia, análise ambiental e análise econômica.

3.6. Considerações finais

Considerando o Programa de Eficiência Energética como o objeto de estudo dessa tese, a metodologia desenvolvida foi apresentada. As etapas foram detalhadas com destaque para o modelo de determinação de índices de eficiência e classificação dos projetos, com função objetivo de minimização dos custos totais de energia economizada e maximização da economia de energia e redução da demanda no horário de ponta, através da análise por envoltória de dados. No capítulo seguinte, a análise e classificação dos projetos será apresentada, bem como um estudo de caso e validação da modelo elaborado.

CAPÍTULO 4. ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Apresenta-se a seguir a análise dos resultados obtidos e como o modelo proposto pode contribuir com o PEE, entre outras soluções, objetivando correlacionar as oportunidades regionais de ação de eficiência energética e demais ganhos para todos os envolvidos no projeto, como o aumento da capacidade de distribuição de energia elétrica e redução de emissões de gases estufa.

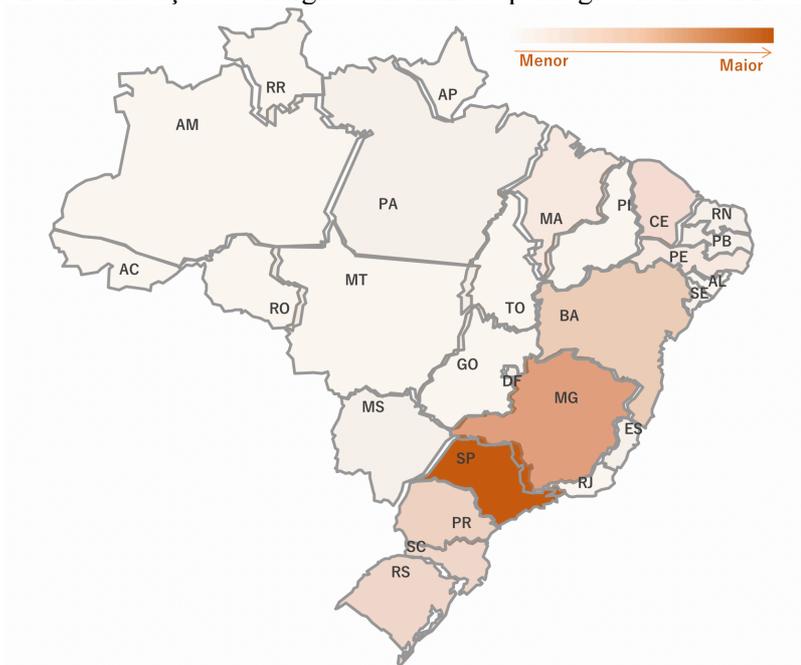
A partir dos resultados foram obtidos a distribuição da energia economizada por estado e região do país, a energia economizada *per capita*, além do custo da energia economizada por região. Os resultados dos projetos por tipologia foram analisados, considerando as variáveis energia economizada, redução de demanda no horário de ponta, custo total dos projetos, custo total da energia economizada e RCB. As tipologias de projetos também foram analisadas por tipo de uso final.

Para a aplicação do modelo DEA, adotou-se doze tipologias como unidades de tomada de decisão (DMU), e os índices de eficiência foram definidos para cada DMU, assim como os pesos para as unidades classificadas como ineficientes. O teste e validação do modelo proposto é realizado através de um estudo de caso, de um projeto do PEE da tipologia poder público executado em 2017, com os resultados comparados com modelos de viabilidade econômica apresentados ao final do capítulo.

4.1. Análise geral dos projetos

Analisando-se a distribuição da energia economizada por região do Brasil no período entre 2008 e 2016, elaborou-se o mapa da Figura 20.

Figura 20. Distribuição da energia economizada por região no Brasil 2008-2016.

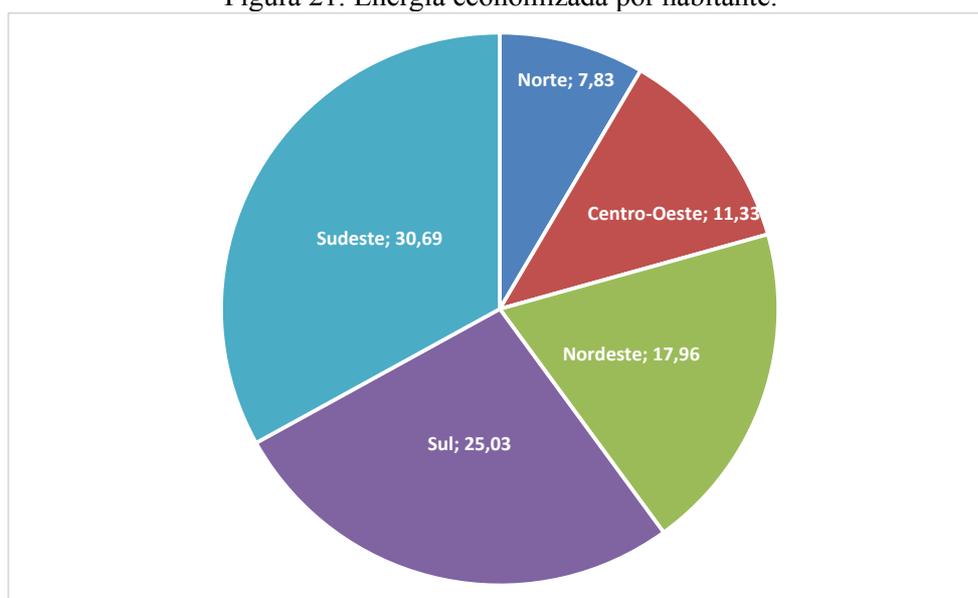


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se a concentração da energia economizada na região Sudeste, com destaque para os estados de São Paulo e Minas Gerais, a região é responsável por 56,19% da energia economizada no período analisado, a região Nordeste 21,72%, sul 15,62%, Centro-oeste 3,63% e Norte 2,83%.

Na Figura 21, tem-se a distribuição média da energia economizada por habitante de cada região, em kWh/ano (ANEEL, 2016; IBGE, 2017).

Figura 21. Energia economizada por habitante.

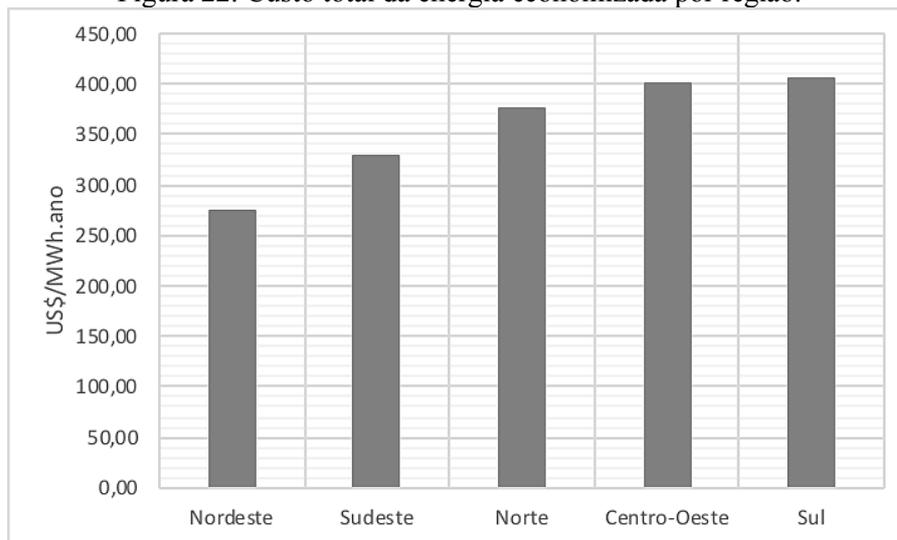


Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se a energia economizada *per capita*, a participação da região Sul se aproxima da região Sudeste, com 25,03 e 30,69 kWh/ano *per capita*, respectivamente. A região Norte com 7,83 kWh/ano *per capita* se mantém com o menor indicador de energia economizada.

Quanto ao custo total da energia economizada, na Figura 22 apresentam-se os dados distribuídos por região.

Figura 22. Custo total da energia economizada por região.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O menor custo ocorre na região Nordeste, 273,21 US\$/MWh/ano, e o maior na região sul, 405,16 US\$/MWh/ano, representando uma variação de 33%.

Na Tabela 15, apresenta-se a distribuição percentual da energia economizada por tipologia em cada região brasileira.

Tabela 15. Distribuição percentual da energia economizada por tipologia para cada região.

Tipologia	Norte	Centro-Oeste	Sul	Nordeste	Sudeste
Baixa renda	3,61	4,65	15,60	22,47	53,66
Poder público	3,13	1,44	14,59	7,57	73,27
Comércio e serviços	0,28	1,65	40,65	16,53	40,88
Serviço público	1,96	1,28	5,48	5,42	85,86
Residencial	3,76	2,73	8,71	37,92	46,88
Industrial	0	0,51	24	0,45	75,05
Rural	0	0,37	88,99	10,64	0
Aquecimento solar	0	0	2,83	4,44	92,73
Projeto piloto	0	18,22	15,58	46,04	20,16
Cogeração	0,74	0	0	0	99,26
Iluminação pública	0	0	33,09	65,65	1,26
Lado da oferta	0	0	0	100	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A região Sudeste executou a maioria dos projetos das tipologias baixa renda, poder público, serviço público, industrial, aquecimento solar e cogeração. A maior parte dos projetos de iluminação pública e projeto piloto foram realizados no Nordeste, assim como o único projeto do lado da oferta. A região Sul se destaca pelos projetos da tipologia rural, com 88,99 %, além de dividir o protagonismo com o Sudeste na execução dos projetos de comércio e serviços. As regiões Norte e Centro-Oeste, não apresentam protagonismo em nenhuma tipologia especificamente.

Apresenta-se na Tabela 16 os dados das variáveis em relação à tipologia.

Tabela 16. Programa Brasileiro de Eficiência Energética - Total de dados por tipologia.

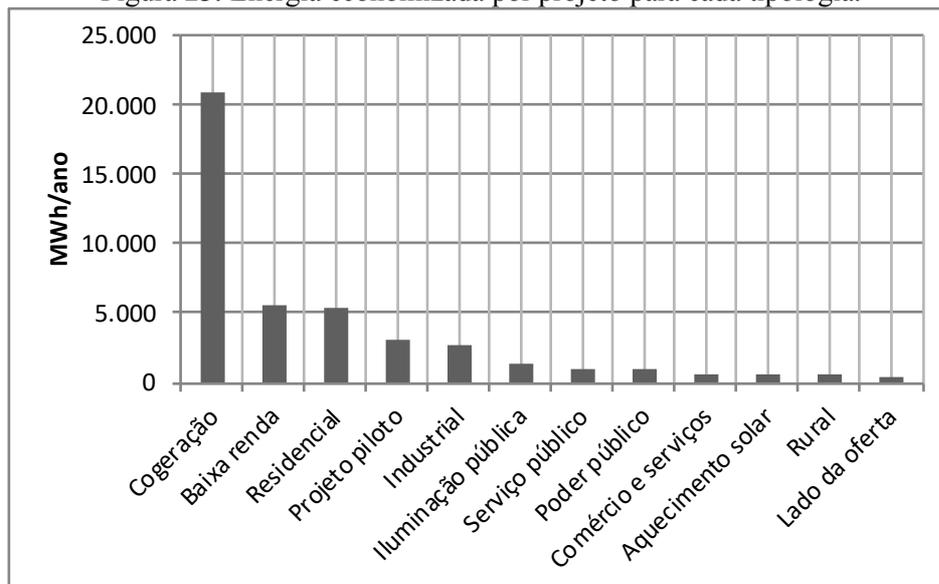
Tipologia	Total de projetos	Energia economizada (MWh/ano)	Redução da demanda no horário de ponta (kW)	Custo total (US)	Custo da energia economizada (US/MWh)	RCB
Baixa renda	451	2.488.927,53	935.344,84	880.703.377,96	353,85	0,58
Poder público	422	382.424,42	78.888,80	140.507.574,47	367,41	0,67
Comércio e serviços	230	141.307,03	15.892,99	39.661.025,49	280,67	0,68
Serviço público	141	140.129,50	30.292,63	45.654.029,53	325,80	0,61
Residencial	129	683.082,95	187.785,59	178.515.584,55	261,34	0,58
Industrial	64	174.390,01	12.211,66	32.247.409,83	184,92	0,51
Rural	57	32.731,65	16.413,11	7.192.347,66	219,74	0,24
Aquecimento solar	41	23.703,48	15.591,45	22.452.853,05	947,24	0,64
Projeto piloto	25	75.300,92	21.089,74	21.294.406,27	282,79	0,86
Cogeração	7	146.193,60	16.501,99	42.403.049,02	290,05	0,51
Iluminação pública	4	5.587,78	1.171,88	2.377.029,55	425,40	0,61
Lado da oferta	1	480,00	320,00	1.668.922,13	3.476,92	1,93
Educacional	91	-	-	70.679.681,37	-	-
Gestão energética municipal	14	-	-	2.891.823,73	-	-
Total	1.677	4.294.258,87	1.331.504,68	1.488.249.114,60	346,57	0,70

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar o número de projetos, nos quais as cinco tipologias com maior participação são: baixa renda com 451 (26,89%); poder público com 422 (25,16%); comércio e serviços com 230 (13,71%); serviço público com 141 (8,41%) e residencial com 129 (7,69%). O único projeto do lado da oferta, consistiu na implantação da usina solar fotovoltaica no estádio de futebol Roberto Santos, em Salvador, Bahia. A tipologia de baixa renda consiste em projetos com investimentos em consumidores que se beneficiam da tarifa social devido à redução da renda familiar, na qual há troca de equipamentos ineficientes (refrigeradores e lâmpadas) para novos com maior eficiência. Os projetos de poder público não são reembolsáveis, com grande potencial para aumentar a eficiência de suas instalações.

Na Figura 23 as economias de energia por projeto por tipologia são apresentadas. Quanto à energia economizada por projeto, as tipologias com o melhor desempenho são a cogeração, baixa renda, residencial, projeto piloto e industrial.

Figura 23. Energia economizada por projeto para cada tipologia.

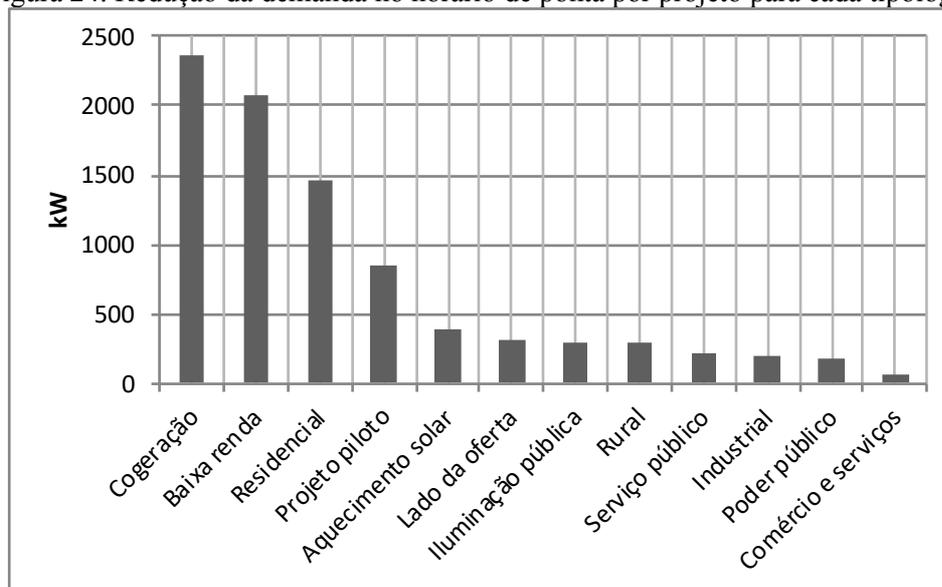


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que a cogeração apresenta 3,77 vezes a economia de energia por projeto executado que a tipologia de baixa renda, que tem um maior número de projetos executados. A baixa redução do consumo nos projetos de tipologia de poder público deve ser destacada, apesar de representar $\frac{1}{4}$ do total de projetos analisados.

A Figura 24 mostra o gráfico com a redução da demanda no horário de ponta (RDP) por projeto. No gráfico de linha, as maiores taxas de redução ocorreram em projetos de cogeração (2.357,43 kW/projeto), baixa renda (2.073,94 kW/projeto), residencial (1.455,70 kW/projeto), projeto piloto (843,59 kW/projeto) e aquecimento solar (380,28 kW/projeto).

Figura 24. Redução da demanda no horário de ponta por projeto para cada tipologia.

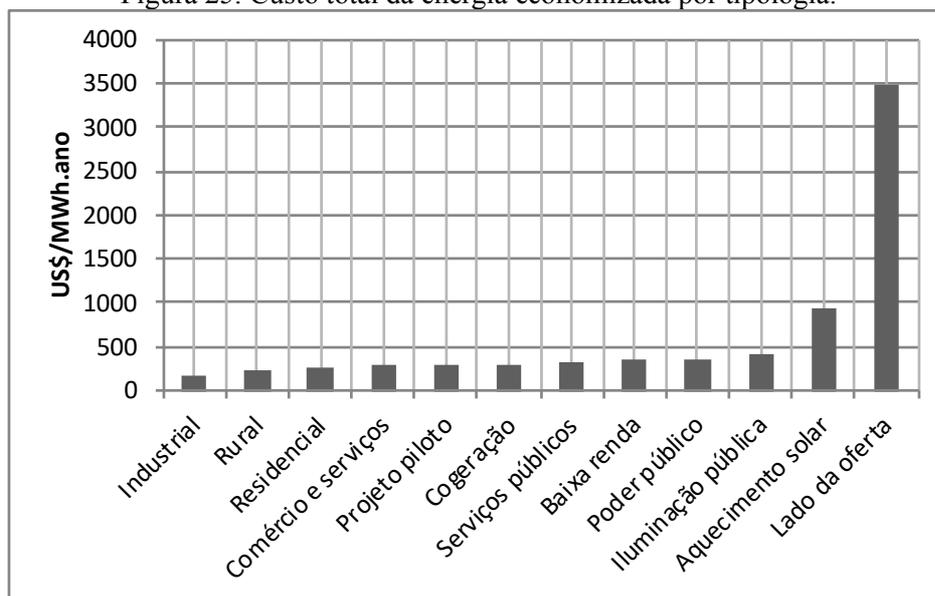


Fonte: Elaborada pelo autor.

As tipologias de iluminação pública e industrial caracterizadas pela operação durante as horas de ponta, no entanto, não observaram essa correlação nos dados analisados, com taxas médias de redução de 292,97 kW/projeto e 190,81 kW/projeto, respectivamente. Várias classes de consumidores de outras tipologias, geralmente, têm grande participação no horário de ponta, tais como: serviço público (empresas de água e esgoto); comércio e serviços (*shoppings*, supermercados, escolas, escritórios de negócios e outros); poder público (hospitais, universidades, escolas e delegacias de polícia), embora haja uma baixa representação dessas tipologias nos resultados de redução da demanda nas horas de ponta.

O custo da energia economizada por tipologia foi analisado utilizando a relação entre o investimento total realizado e as economias de energia. Na Figura 25 tem-se o gráfico do custo total da energia economizada, na qual a tipologia industrial com 184,92 US\$/MWh/ano é aquela com o menor custo, seguido de 219,74 US\$/MWh/ano da rural, residencial 261,34 US\$/MWh/ano, comércio e serviços 280,67 US\$/MWh/ano, projeto piloto 282,79 US\$/MWh/ano e cogeração 290,05 US\$/MWh/ano. O único projeto sobre o custo do lado da oferta foi de 3.479,92 US\$/MWh/ano, o maior entre as tipologias.

Figura 25. Custo total da energia economizada por tipologia.

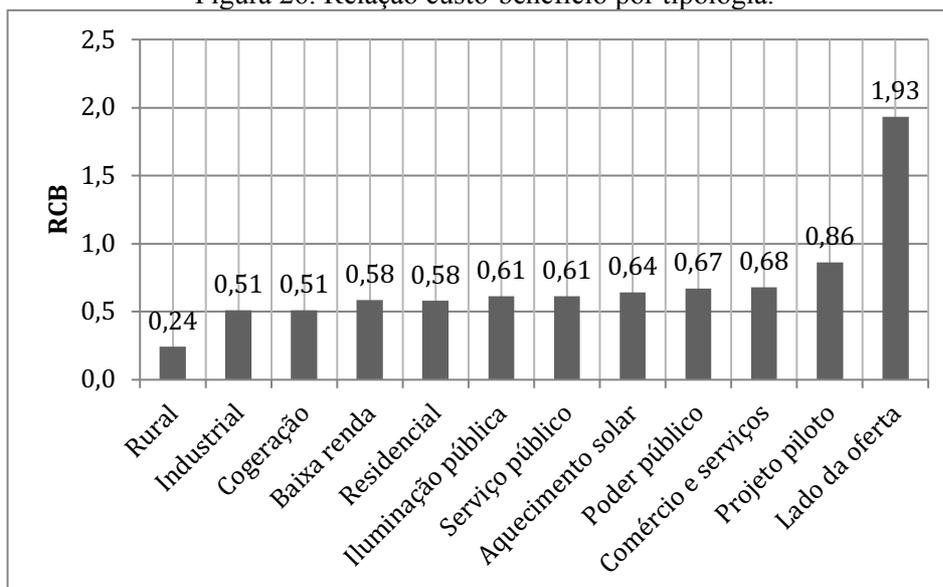


Fonte: Elaborada pelo autor.

As tipologias com maior número de projetos são de baixa renda e poder público. Apresentaram custos de 353,85 US\$/MWh/ano e 367,41 US\$/MWh/ano, respectivamente.

Quanto ao RCB, os resultados são detalhados na Figura 26, destacando-se as tipologias rural, cogeração, industrial, de baixa renda e residencial. Os projetos com RCB acima de 1 indicam custos maiores do que os benefícios, denotando o fracasso das ações, pelo menos em relação à eficiência energética.

Figura 26. Relação custo-benefício por tipologia.

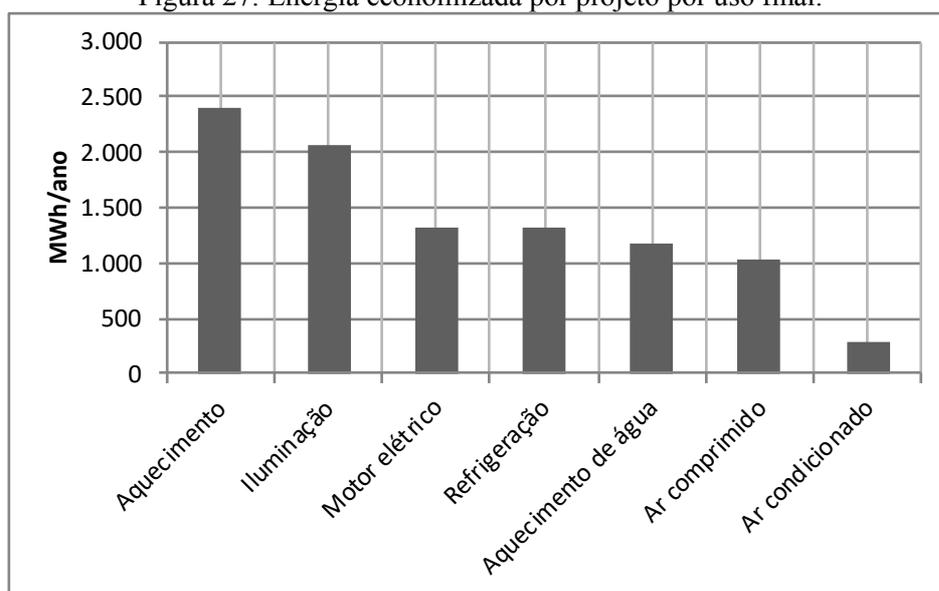


Fonte: Elaborada pelo autor.

Além das tipologias, o banco de dados fornece a classificação de projetos em relação ao uso final de energia, classificados em sete tipos: aquecimento, iluminação, motor elétrico, refrigeração, aquecimento de água, ar comprimido e ar condicionado.

De acordo com a Figura 27, os seguintes usos finais de energia se destacam, aquecimento com 8 projetos e economia de energia média por projeto de 2.398,39 MWh/ano; iluminação com 1.247 projetos e 2.069,18 MWh/ano; Motores elétricos com 133 projetos e 1.314,61 MWh/ano.

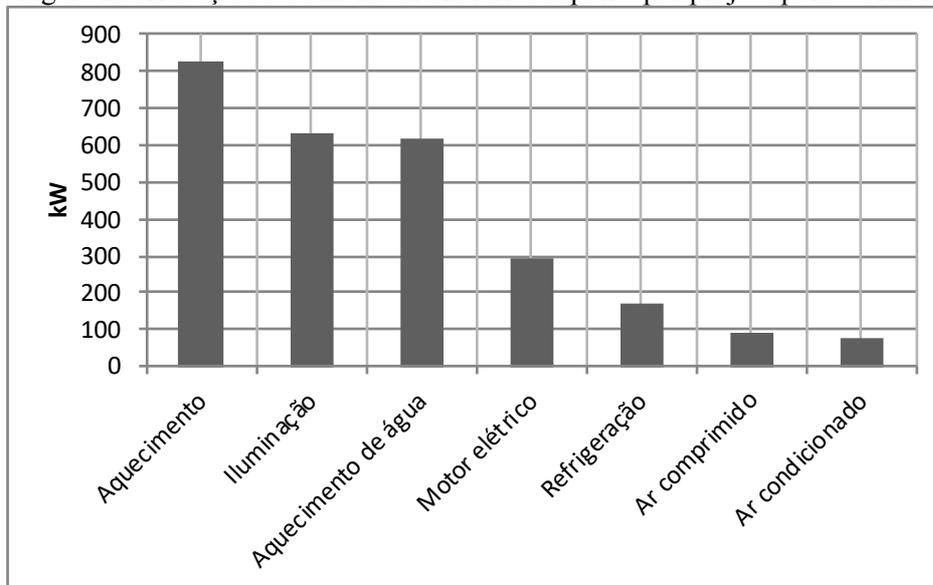
Figura 27. Energia economizada por projeto por uso final.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A redução da demanda no horário de ponta, pode ser observada na Figura 28, em que o uso final, aquecimento, com apenas oito projetos, realizou uma redução de 828,18 kW/projeto, iluminação 632,67 kW/projeto, aquecimento de água 615,03 kW/projeto, motor elétrico 290,27 kW/projeto, refrigeração 173,95 kW/projeto, ar comprimido 92,20 kW/projeto, ar condicionado 76,36 kW/projeto.

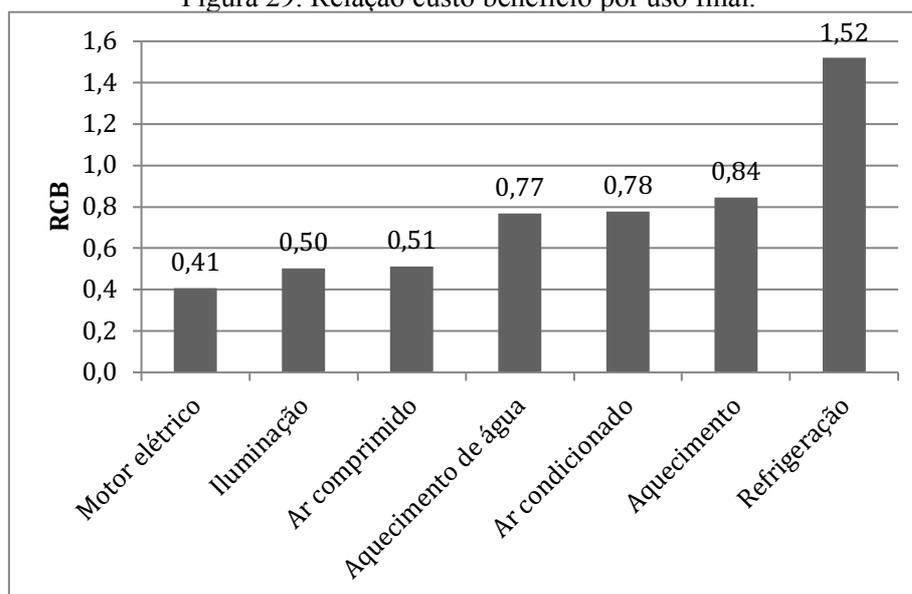
Figura 28. Redução da demanda no horário de ponta por projeto por uso final.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 29 mostra o desempenho do consumo final de energia de acordo com o RCB, os três primeiros estão abaixo de 0,7, no caso, motor elétrico com 0,41; iluminação com 0,50 e ar comprimido com 0,51.

Figura 29. Relação custo benefício por uso final.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tipologia “Outros” não foi considerada na análise, a qual apresentou a maior economia de energia por projeto e 244 projetos, mas isso representa uma falha na classificação dos dados, e a agência reguladora deve criar uma estratégia para reduzir os resultados que mostram impacto considerável sem classificação adequada. Ressalta-se também, a denominação dúbia presente na base de dados, como, Aquecimento e Aquecimento solar, assim como classificações pouco utilizadas na literatura ou em até mesmo em relatórios Brasileiros, como o Plano Nacional de Eficiência Energética, que utiliza o termo Sistema Motrizes, ao invés de Motores Elétricos.

Em relação à avaliação dos dados apresentados, nota-se que as tipologias de projetos têm um desempenho diversificado em relação às variáveis consideradas, com os projetos de menor custo de energia economizada, embora com baixa redução de demanda ou menos economia de energia do que outras tipologias com maior custo de energia salva.

4.2. Classificação dos projetos de eficiência energética

A classificação dos projetos de eficiência energética foi obtida por meio da simulação do modelo DEA, em que, adotou-se as tipologias como unidades de tomada de decisão, considerando uma entrada e duas saídas, para caracterizar o problema. A partir da modelagem o índice de desempenho entre as tipologias foi determinado e conseqüentemente a fronteira de eficiência e os alvos a serem utilizados nas unidades de decisão ineficientes.

4.2.1. Simulação do modelo de análise por envoltória de dados

A partir da análise da base de dados dos projetos de eficiência energética, observou-se uma variação considerável entre os resultados dos projetos para as diferentes tipologias, sobretudo em relação à quantidade de projetos executados, custo total dos projetos, e principalmente a economia de energia e redução de demanda obtidos. Diante deste problema e suas características, foi escolhido um método para classificar os projetos e a obtenção de pesos (metas) para ajuste das variáveis e obter parâmetros para elaboração de projetos com melhor desempenho, podendo ser implantado em um sistema para análise de viabilidade e submissão de projetos ao Programa de Eficiência Energética da ANEEL.

Os índices de eficiência foram determinados a partir do modelo DEA, resultando na classificação das tipologias de projeto, através da formação da fronteira de eficiência. As tipologias que não alcançam a fronteira serão avaliadas e os pesos necessários para que elas

atinjam a fronteira de eficiência serão determinados, conforme especificado no capítulo 3, seção 3.4.1. Listaram-se na Tabela 17, os dados utilizados na simulação.

Tabela 17. Dados das DMU utilizados na simulação.

DMU	Entrada 1	Saída 1	Saída 2
Baixa renda	353,85	5.518,69	2.073,94
Poder público	367,41	906,22	186,94
Comércio e serviços	280,67	614,38	69,10
Serviço público	325,80	993,83	214,84
Residencial	261,34	5.295,22	1.455,70
Industrial	184,92	2.724,84	190,81
Rural	219,74	574,24	287,95
Aquecimento solar	947,24	578,13	380,28
Projeto piloto	282,79	3.012,04	843,59
Cogeração	290,05	20.884,80	2.357,43
Iluminação pública	425,40	1.396,95	292,97
Lado da oferta	3.476,92	480,00	320,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

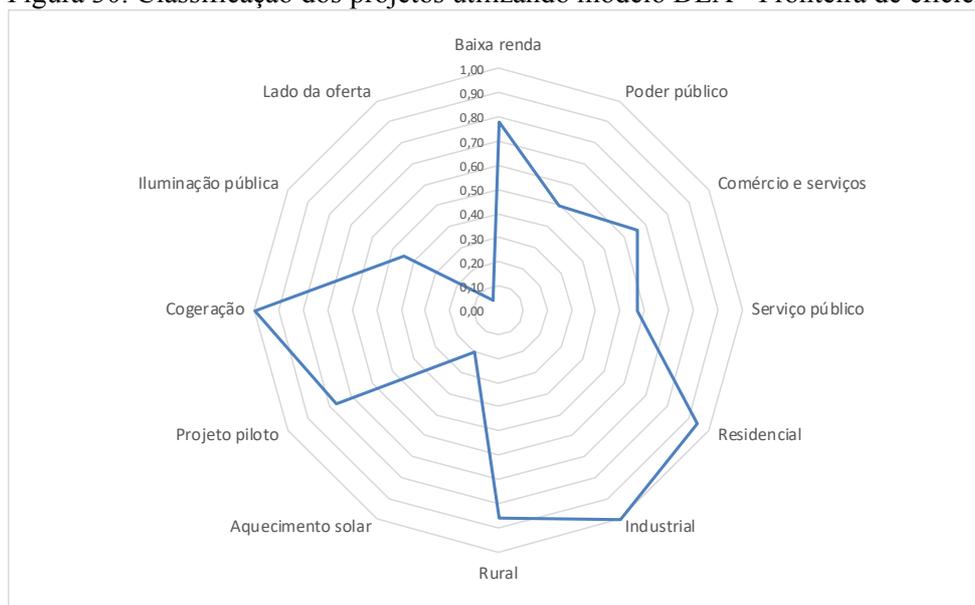
Foi realizada a simulação em relação à entrada, com a função objetivo modelada para a minimização do custo total da energia economizada, de acordo com as equações 10, 11 e 13. Os resultados dos índices de eficiência e pesos para cada DMU foram determinados, e apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Índices de eficiência e pesos para cada DMU.

DMU	Índice de eficiência - E	Pesos		
		Entrada	Saída 1	Saída 2
Baixa renda	0,7808	0,00282606	0	0,00013713
Poder público	0,5033	0,00272175	0	0
Comércio e serviços	0,6588	0,0035629	0	0
Serviço público	0,5711	0,00306937	0	0,00014893
Residencial	0,9424	0,00382643	0	0,00018567
Industrial	1,00	0,00540774	0,00003131	0
Rural	0,8629	0,00455083	0	0,00022082
Aquecimento solar	0,2049	0,0010557	0	0,00005123
Projeto piloto	0,7659	0,00353619	0	0,00017159
Cogeração	1,00	0,00344768	0,00004788	0
Iluminação pública	0,4463	0,00235073	0	0,00011406
Lado da oferta	0,0549	0,00028761	0	0,00001396

A partir da modelagem apresentada na seção 3.4, apenas duas tipologias são eficientes: industrial e cogeração, conforme observado no gráfico da fronteira de eficiência na Figura 30.

Figura 30. Classificação dos projetos utilizando modelo DEA - Fronteira de eficiência.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dez tipologias foram classificadas como ineficientes: residencial, rural, baixa renda, projeto-piloto, comércio e serviços, serviço público, poder público, iluminação pública, aquecimento solar e lado da oferta. Utilizou-se a variável λ_j para análise de *benchmarking*, objetivando determinar o grau de influência das DMU eficientes em relação às ineficientes, conforme os dados da Tabela 19.

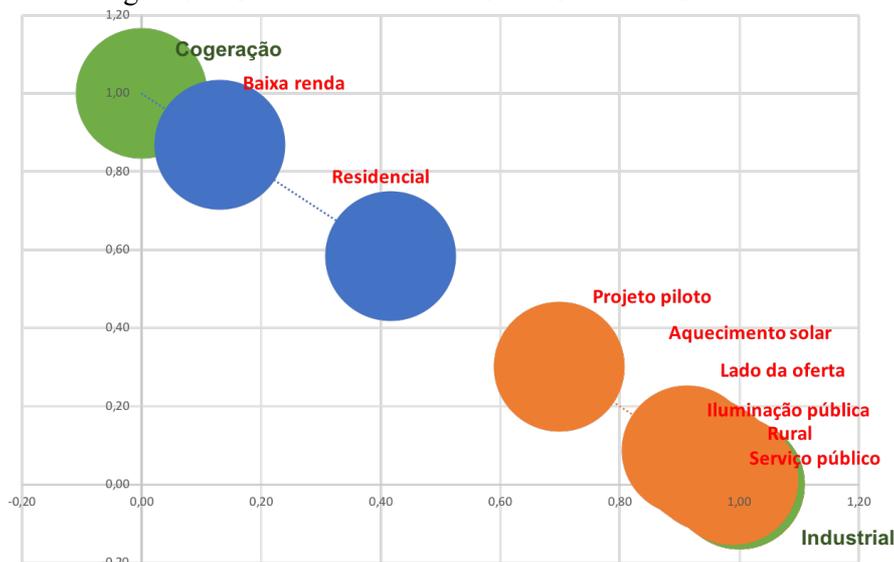
Tabela 19. Análise de *benchmarking*.

DMU eficientes	Industrial	Cogeração
DMU ineficientes		
Baixa renda	0,13084436	0,86915564
Poder público	1	0
Comércio e serviços	1	0
Serviço público	0,98890899	0,01109101
Residencial	0,41619204	0,58380796
Industrial	1	0
Rural	0,95516519	0,04483481
Aquecimento solar	0,91255042	0,08744958
Projeto piloto	0,69871043	0,30128957
Cogeração	0	1
Iluminação pública	0,95284822	0,04715178
Lado da oferta	0,94037256	0,05962744

Fonte: Elaborada pelo autor.

O grau de influência também pode ser demonstrado no gráfico da Figura 31.

Figura 31. Grau de influência das DMU eficientes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando a equação 13, quantificou-se quanto cada variável deve ser aumentada para que os projetos atinjam o mesmo desempenho que os projetos na fronteira de eficiência. Na Tabela 20, os resultados são apresentados considerando-se o modelo com minimização de entrada.

Tabela 20. Aumento percentual para limite de eficiência - Modelo orientado a entrada.

Tipologia	Custo da energia economizada -Meta (%)	Energia economizada por projeto-Meta (%)	Redução da demanda de ponta por projeto - Meta (%)
Residencial	-5,76	151,68	0.0
Rural	-13,70	516,30	0.0
Baixa renda	-21,92	235,38	0.0
Projeto piloto	-23,41	172,12	0.0
Comércio e serviços	-34,11	343,51	176,14
Serviço público	-42,88	194,44	0.0
Poder público	-49,67	200,68	2,07
Iluminação pública	-55,37	156,35	0.0
Aquecimento solar	-79,51	646,01	0.0
Lado da oferta	-94,50	693,26	0.0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para alcançar o limite de eficiência, deve-se reduzir o custo de energia economizada por projeto investido na tipologia do lado da oferta em 94,50 % e aumentar em 693,26 % a energia economizada por projeto, a DMU mais ineficiente. O aquecimento solar deve reduzir em 79,51 % o custo de energia economizada e aumentar 646,01 % a energia economizada. A tipologia

da iluminação pública deve reduzir em 55,37 % o custo de energia economizada e aumentar 156,35 % a quantidade de energia economizada. A tipologia poder público deve reduzir o custo de energia economizado em 49,67 % e aumentar 200,68 % da economia de energia e 2,07 % da redução da demanda máxima. Residencial é a DMU ineficiente mais próxima do limite, deve reduzir em 5,76 % o custo de energia economizada e aumentar 151,68 % da energia economizada por projeto.

Com base na análise dos resultados dos projetos de anos anteriores, é sugerido o estabelecimento de pesos para os projetos de tipologias que não atingem a fronteira de eficiência; ou seja, tais tipologias de projetos não serão atendidas, mas, dependendo de seu desempenho diminuído em relação ao limite, elas devem alcançar melhores resultados em economia de energia e redução durante o horário de ponta para sua aprovação. Na tipologia de poder público e serviços públicos, os recursos não são reembolsáveis, sem a obrigação de contratos de desempenho, o que pode resultar em economias mais baixas.

Com esses resultados, pode-se inferir que uma redistribuição de investimentos deve potencializar a aplicação de recursos, visando maiores economias de energia e redução da demanda no horário de ponta.

4.2.2. Estudo de caso

Como estratégia de validação do modelo desenvolvido, utilizou-se um estudo de caso de um projeto elaborado e executado através do PEE entre 2016 e 2017, em uma unidade consumidora da tipologia Poder Público. A UC é atendida em média tensão, pertencente ao grupo tarifário A4, com tarifa horária verde e demanda contratada de 605 kW. Em relação ao diagnóstico energético realizado, foram prospectados três usos finais de energia potenciais para o projeto: climatização, aquecimento e iluminação. Optando-se inicialmente pela atuação apenas nos sistemas de climatização.

As ações de eficiência energética consistiram na adequação do sistema de climatização à carga térmica e substituição de aparelhos de ar condicionado com baixa eficiência por aparelhos com maior rendimento energético, resultando na substituição de quarenta e oito aparelhos de ar condicionado e suas respectivas instalações dos circuitos térmicos. Na Tabela 21, apresentam-se os dados dos equipamentos substituídos, constituintes da linha de base do projeto.

Tabela 21. Ações de eficiência energética - equipamentos linha de base.

Potência nominal de refrigeração (BTU/h)	Tipo/Tecnologia	Quantidade	Coefficiente de eficiência energética (W/W)	Fator de utilização
60.000	Air split/rotação fixa	13	2,3	0,8
48.000	Air split/rotação fixa	1	2,5	0,8
36.000	Air split/rotação fixa	1	2,3	0,8
22.000	Air split/rotação fixa	4	2,3	0,8
18.000	Janela/rotação fixa	9	2,0	0,9
12.000	Janela/rotação fixa	7	2,0	0,9
10.000	Janela/rotação fixa	10	2,0	0,9
7.500	Janela/rotação fixa	3	2,0	0,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 22, listam-se os equipamentos propostos na ação de eficiência energética.

Tabela 22. Ações de eficiência energética- equipamentos projeto proposto.

Potência nominal de refrigeração (BTU/h)	Tipo/Tecnologia	Quantidade	Coefficiente de eficiência energética (W/W)	Fator de utilização
57.000	Air split/rotação fixa	13	3,24	0,7
48.000	Air split/rotação fixa	1	3,28	0,7
36.000	Air split/rotação fixa	1	3,26	0,7
22.000	Air split/rotação fixa	4	3,30	0,5
18.000	Air split/rotação variável	9	3,40	0,5
12.000	Air split/rotação variável	7	3,54	0,5
9.000	Air split/rotação variável	10	3,34	0,5
9.000	Air split/rotação variável	3	3,34	0,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

E na Tabela 23, os dados dos custos do projeto.

Tabela 23. Detalhamento de Custos do projeto.

Tipo de custo	Valor (R\$)	Distribuição (%)
Projeto-diagnóstico, M&V	15.537,06	6,24
Equipamentos	148.336,00	59,54
Serviços- Mão de obra	67.762,32	27,20
Descarte de equipamentos	7.500,00	3,01
Treinamento	2.000,00	0,8
Divulgação e <i>marketing</i>	8.000,00	3,21
Total	249.135,94	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o cálculo do fator de recuperação de capital utilizou-se uma taxa de desconto no valor de 8 %.

Utilizando-se a metodologia do PEE, por meio das equações de (1) a (8), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 24.

Tabela 24. Resumo resultados do projeto- Caso PEE

Parâmetros	Resultados
Tipologia	Poder público
Uso Final - AEE	Climatização
Vida útil média (anos)	12
Energia Economizada (MWh/ano)	138,13
RDP (kW)	19,75
Custo total do projeto (R\$)	249.135,94
Custo total da energia economizada (R\$/MWh.ano)	1.803,63
Custo da energia economizada (R\$/MWh)	239,34
Custo anualizado	33.059,09
Benefício anualizado	58.113,37
RCB	0,57

Fonte: Elaborada pelo autor.

O custo total de energia economizada resultante foi de 1.803,63 R\$/MWh/ano, considerando a taxa de conversão de moeda de 3,33, tem-se 541,63 U\$/MWh/ano. De acordo com a metodologia proposta, as tipologias que atingem a fronteira de eficiência são a industrial e a cogeração, com custos totais de energia economizada de 184,92 e 290,05 U\$/MWh/ano respectivamente. Na Tabela 18, apresenta-se os pesos para as demais tipologias atingirem a fronteira de eficiência. De acordo com o modelo proposto, os valores do custo total da energia economizada, energia economizada por projeto e redução de demanda na ponta para atingir a fronteira de eficiência correspondem aos dados da Tabela 25.

Tabela 25. Metas para fronteira de eficiência – poder público.

Custo total da energia economizada	Energia economizada por projeto	Redução da demanda de ponta por projeto
-49,67(%)	200,68(%)	2,07(%)
272,60 U\$/MWh.ano	277,20 MWh/ano	20,16 kW

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para atender às metas, o projeto deve incluir outras ações de eficiência energética prospectadas no diagnóstico energético, tomou-se como base o custo por ação de eficiência energética citato por Guardia *et al.* (2010), 62,23 R\$/MWh, para ações de gerenciamento e automação. Na Tabela 26 apresentam-se os resultados da simulação com o projeto atendendo as metas para atingir a fronteira de eficiência.

Tabela 26. Resumo dos resultados do projeto - Caso fronteira de eficiência.

Parâmetros	Resultados
Tipologia	Poder público
Uso Final - AEE	Climatização
Uso Final - AEE	Gestão/gerenciamento
Vida útil média (anos)	12
Energia Economizada (MWh/ano)	327,07
RDP (kW)	58,74
Custo total do projeto (R\$)	321.350,09
Custo total da energia economizada (R\$/MWh.ano)	982,51
Custo da energia economizada (R\$/MWh)	130,37
Custo anualizado	42.641,55
Benefício anualizado	148.981,84
RCB	0,29

Fonte: Elaborada pelo autor.

A determinação dos pesos para o alcance da fronteira de eficiência, resultou em um projeto com relação custo benefício significativamente melhor.

Com objetivo de validar a metodologia, realizou-se um estudo de viabilidade econômica e ambiental, para demonstrar a atratividade do investimento com modelos utilizados no mercado, tanto por investidores quanto por instituições bancárias. Foram simulados para os dois casos, PEE e fronteira de eficiência.

Para a análise da viabilidade os modelos Valor presente líquido (VPL) e Taxa interna de retorno (TIR) foram utilizados, conforme as equações (14) e (15) respectivamente.

$$VPL = C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+i)^j} \quad (14)$$

Em que:

C_j - valores do fluxo de caixa em cada período de tempo;

C_0 - valor do investimento inicial;

j - períodos de tempo;

n - número de períodos;

i - taxa de desconto.

A TIR corresponde à taxa de desconto que zera o valor presente líquido de um projeto, conforme a equação (15).

$$C_0 = \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+i)^j} \quad (15)$$

Na Tabela 27 apresenta-se os parâmetros financeiros utilizados, ressalta-se, que apenas a taxa de desconto e a vida útil do projeto são utilizados pelo modelo do PEE.

Tabela 27. Parâmetros financeiros.

Parâmetro	Valor
Taxa de inflação	2,95 %
Taxa de desconto	8,0 %
Reajuste de eletricidade	2,95 %
Vida do projeto	12 anos

Fonte: Elaborada pelo autor.

A taxa de inflação utilizada foi determinada pelo Banco Central do Brasil em 2017 (BCB, 2017). Considerou-se a taxa de desconto indicada pela ANEEL para os projetos do PEE. Utilizou-se um valor de reajuste de eletricidade mínimo, baseado na inflação de 2017. Quanto a vida do projeto, é relativa a vida útil dos equipamentos do projeto proposto, de acordo com a ANEEL (2013a).

Os resultados de viabilidade econômica no caso PEE são apresentados na Tabela 28.

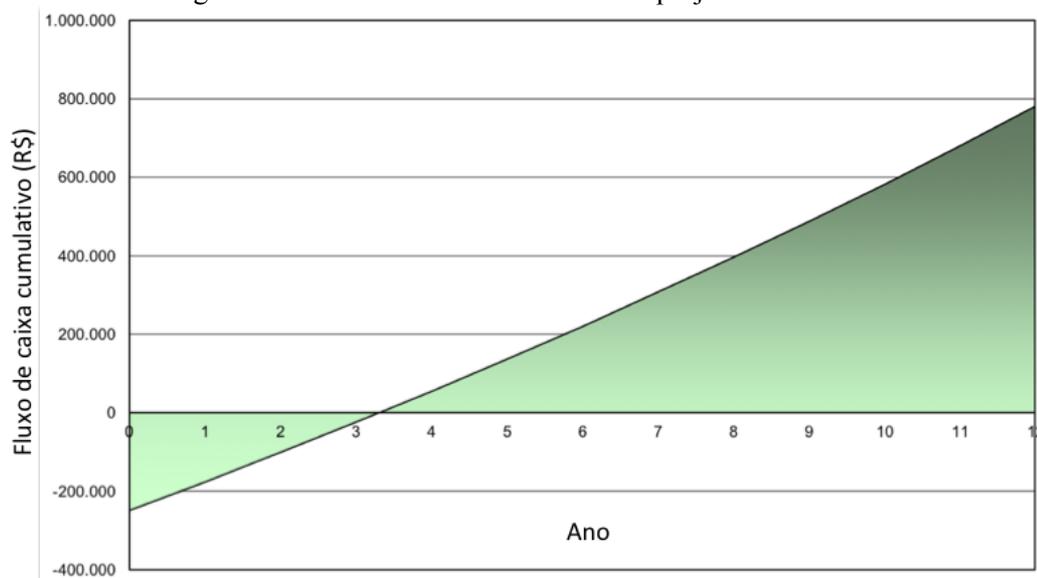
Tabela 28. Resultados da viabilidade econômica - Caso PEE.

Parâmetro	Valor
TIR após impostos - capital	30,4 %
TIR após impostos - ativos	30,4 %
Retorno simples	3,5 anos
Retorno do capital próprio	3,3 anos
VPL	R\$ 380.096,00
Economia anual no ciclo de vida	50.437,00 R\$/ano
Razão benefício custo	2,53

Fonte: Elaborada pelo autor.

No gráfico da Figura 32, observa-se o fluxo de caixa cumulativo obtido com a simulação, com retorno do capital próprio em 3,3 anos, em torno de 25% da vida útil estimada para o projeto. Resultando em VPL positivo ao final da vida do projeto.

Figura 32. Fluxo de caixa cumulativo do projeto - Caso PEE.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A redução anual líquida de emissões foi de 11,3 tCO₂, o que equivale a 1 hectare de floresta absorvendo carbono (considerou-se um fator de emissão de 0,082 tCO₂/MWh). Para o caso fronteira de eficiência, os resultados de viabilidade econômica são apresentados na Tabela 29.

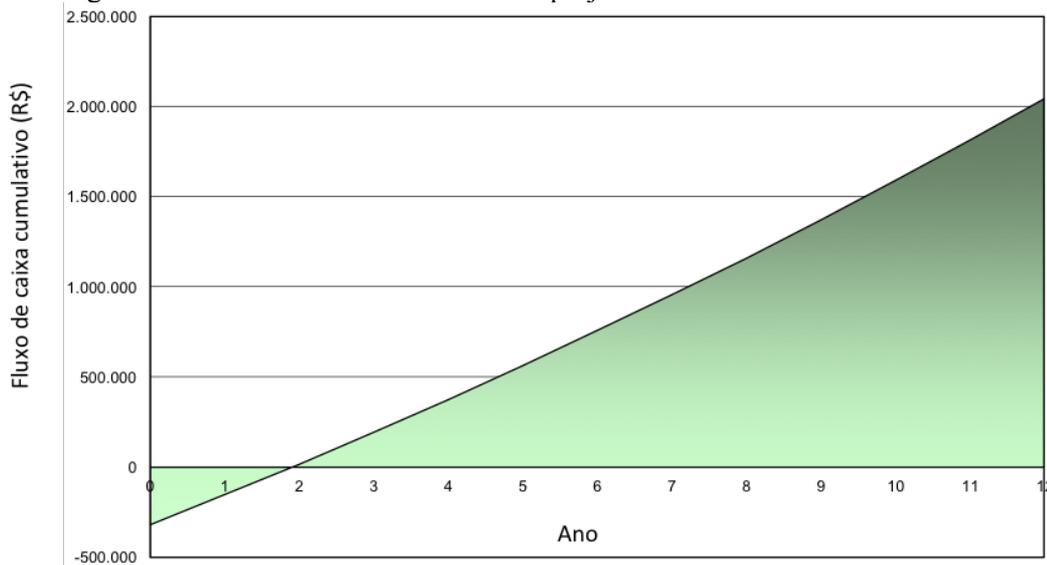
Tabela 29. Resultados da viabilidade econômica - Caso fronteira de eficiência.

Parâmetro	Valor
TIR após impostos - capital	54,40 %
TIR após impostos - ativos	54,40 %
Retorno simples	2,0
Retorno do capital próprio	1,9
VPL	R\$ 1.123.992,00
Economia anual no ciclo de vida	149.148,00 R\$/ano
Razão benefício custo	4,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se na Figura 33, que o retorno de capital encontrado foi de 2 anos, 16,6 % da vida útil do projeto considerado, além de TIR de 54,4 %.

Figura 33. Fluxo de caixa cumulativo do projeto - Caso fronteira de eficiência.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A redução anual líquida de emissões foi de 22,7 tCO₂, o que equivale a 2,1 hectares de floresta absorvendo carbono (considerou-se um fator de emissão de 0,082 tCO₂/MWh).

Observa-se o melhor desempenho do caso da fronteira de eficiência, em todos os parâmetros analisados.

4.3. Considerações finais

Os resultados apresentados no capítulo, inferem que a energia economizada pelos projetos do PEE no período analisado concentra-se na região Sudeste com 56,19 %, em contraponto, na região Norte com 2,83 %. A energia economizada *per capita*, acompanha os resultados regionais, no Sudeste verificou-se a economia de 30,69 kWh/ano/habitante, enquanto, na região Norte 7,83 kWh/ano/habitante.

Em relação à tipologia, baixa renda e poder público possuem o maior número de projetos, com 26,89 % e 25,16 % respectivamente do total de projetos. Cogeração e baixa renda, apresentam maior taxa de energia economizada por projeto. A tipologia cogeração destaca-se também como a melhor redução de demanda no horário de ponta, com 2,36 MW/projeto, seguido, também, por projetos baixa renda com 2,07 MW/projeto. Deve-se ressaltar que a tipologia iluminação pública, mesmo com operação em coincidência com horário de ponta, apresentou baixa taxa de redução por projeto, 292,97 kW/projeto, de forma semelhante, a tipologia industrial, com baixas taxas de redução no horário de ponta, 190,81 kW/projeto.

A tipologia industrial destaca-se com o menor custo total de energia economizada, com 184,92 US\$/MWh/ano. Quanto ao RCB, o menor valor verificado, 0,24, realizado pela tipologia rural, seguido, pelas tipologias industrial e cogeração, com 0,51.

De acordo com o modelo proposto, as melhores DMU são industriais e cogeração, e entre as tipologias ineficazes, existem 95,76 % do total de projetos executados e 94,72 % dos investimentos aplicados até o momento. Indicando que os resultados do PEE podem ser melhor aproveitados e potencializados, com o estabelecimento de metas, como indicadores a partir das informações dos projetos elaborados anteriormente.

Um estudo de caso foi executado, utilizando modelos econômicos de TIR e VPL para comparar o desempenho do caso PEE com os resultados do caso fronteira de eficiência. Os resultados obtidos inferem o melhor desempenho do caso fronteira de eficiência, com tempo de retorno do investimento de 2 anos, contra 3,3 anos do caso PEE.

Com base nos resultados apresentados, associados à pesquisa abordada nos capítulos anteriores, elaborou-se um conjunto de propostas para contribuir para o aprimoramento do Programa de Eficiência Energética, abordado no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 5. PROPOSTAS PARA O PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA BRASILEIRO

De acordo com os resultados do capítulo anterior, o estabelecimento de indicadores como parâmetro para a aprovação dos projetos de eficiência energética, aumenta a probabilidade da execução de projetos com melhor desempenho, ou seja, com maiores ganhos de energia, e viabilidade econômica e ambiental. A determinação dos pesos permite que projetos com baixo desempenho, tenham a oportunidade de aprimoramento, com a vantagem, do valor da meta estabelecida, seja oriundo do conjunto de resultados dos projetos executados pelo PEE.

Os ganhos dos projetos devem atender aos interesses de todos os agentes do setor, cita-se as unidades consumidoras, distribuidoras de energia elétrica, assim como o Estado Brasileiro. Projetos que não atingem os indicadores de economia, redução de demanda e retorno econômico previstos, tornam-se barreiras à execução de novos projetos. A ausência de ganho físico-financeiro para as concessionárias, também, torna-se fator determinante para a formação de barreiras, fazendo com que as concessionárias concentrem ações na área de divulgação e propaganda, com baixo impacto de economia de energia.

A implantação de sistemas de gestão de energia é imprescindível, para manter a economia alcançada. Além de estabelecer na unidade consumidora colaboradores e/ou consultores qualificados para realização de diagnóstico energético e projetos de eficiência energética.

Apresenta-se a seguir como o modelo proposto pode contribuir com o PEE, entre outras adaptações ao programa, objetivando correlacionar as oportunidades de ações de eficiência energética e demais ganhos para todos os envolvidos no projeto, como o aumento da capacidade de distribuição de energia elétrica e redução de emissões de gases estufa.

5.1. Análise das ações de eficiência energética

Para as tipologias que formam a fronteira de eficiência, o menor custo total de eficiência energética por projeto foi da tipologia industrial com valor de 184,92 US\$/MWh/ano, e a cogeração a maior redução de demanda no horário de ponta, 2,36 kW/projeto, além da maior economia de energia com 20.884,80 MWh/ano, ambos têm o mesmo valor de RCB, 0,51. Mesmo com excelentes resultados em relação às demais tipologias, houve apenas 64 projetos industriais (3,82 % do total), e de cogeração houve 7 projetos (0,42 % do total). Em relação aos

projetos industriais, ressalta-se, negativamente a baixa taxa de redução de demanda de ponta, apenas, 190,81 kW/projeto.

Dentre as tipologias fora da fronteira de eficiência, o poder público, iluminação pública, aquecimento solar e lado da oferta, são as com pior classificação, ou seja, mais distantes da fronteira. Tais resultados indicam a necessidade da readequação do programa de eficiência energética, bem como ações específicas para a disseminação do programa com direcionamento específico para as diversas classes de consumo, com o intuito de aumentar os benefícios e reduzir os custos com a eficiência energética. Desse modo sugere-se a melhor associação das ações de eficiência energética com as diversas tipologias, além de enfatizar o potencial de diversas ações com potencial de economia de energia e redução de demanda no horário de ponta, conforme apresentado na Tabela 30.

Tabela 30. Sugestões de ações de eficiência energética e respectivas tipologias.

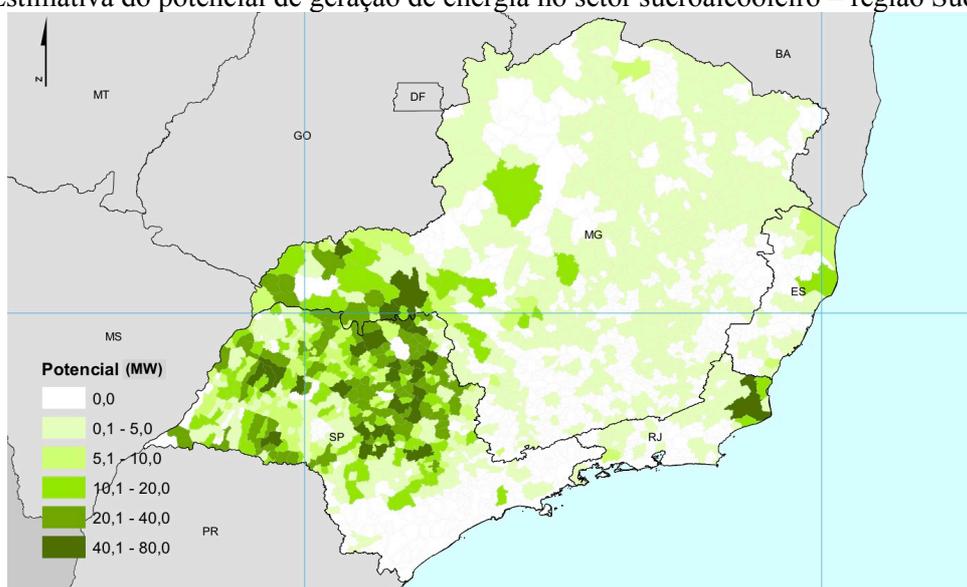
Ação de eficiência energética (AEE)	Tipologia	Observações
1. Cogeração	Cogeração	Incentivos e divulgação; Caldeiras para aquecimento de água; Aproveitamento de resíduos sólidos urbanos; Aproveitamento de resíduos agrícolas;
	Industrial	
	Comércio e serviços	
	Serviços públicos	
	Rural	
2. Redução de perdas técnicas e comerciais	Projetos especiais	Área de grande relevância para as concessionárias, pesquisa e desenvolvimento.
3. Comportamento e uso da energia	Projetos especiais	Projeto piloto com relevância científica, estado da arte do conhecimento, pesquisa e desenvolvimento.
4. Condicionamento ambiental	Residencial	Incluir obras civis, como pintura e revestimento com isolamento térmico de paredes e coberturas.
	Baixa renda	
	Comércio e serviços	
	Industrial	
	Poder público	
	Serviços públicos	
5. Aquecimento solar de água	Industrial	Incentivos a utilização em processos de pré-aquecimento de água, em sistemas de recuperação de calor em indústrias, hospitais, restaurantes, lavanderias, entre outros.
	Comércio e serviços	
	Residencial	
	Baixa renda	
6. Iluminação	Iluminação pública	Tipologia com baixa participação
7. Bônus para eletrodomésticos eficientes	Residencial	Percentual específico obrigatório à todas as concessionárias.
	Baixa renda	
8. Sistemas motrizes	Industrial	Implementação de bônus para a substituição por motores de alto rendimento.
	Serviços públicos	
	Comércio e serviços	
9. Gestão energética	Industrial	Sugere-se aplicação obrigatória para unidades consumidoras contempladas por projetos do PEE.
	Comércio e serviços	
	Poder público	
	Serviços públicos	
10. Capacitação de gestores e técnicos	Educacional	Estender o escopo da tipologia, para abranger o estímulo a participação nas chamadas públicas; incentivo as tipologias com elevado potencial e baixa participação no PEE.
	Poder público	
	Serviços públicos	
	Comércio e serviços	
	Industrial	

Fonte: Elaborada pelo autor.

No item 1 da Tabela 30, a cogeração de energia, embora com pouca participação no PEE apresenta grande potencial de economia de energia, por meio da geração de energia elétrica e térmica. Além disso, proporciona maiores reduções de emissões, pela utilização de resíduos como fonte primária de energia.

Oliveira *et al* (2015) realizaram um estudo de viabilidade e análise de risco, atestando a viabilidade econômica de investimento em projetos de usina de cogeração de biomassa de palma de óleo quando há produção de óleo de palma para outros fins (indústrias: químicas, cosmética, de alimentos e biocombustível, entre outros) e a existência da matéria-prima, no caso o bagaço da palma é abundante e concentrada. Coelho *et al* (2012) apresentam, no Atlas de Bioenergia do Brasil, a distribuição da biomassa no território brasileiro, denotando seu potencial, conforme exemplificado com os mapas das regiões Sudeste e Sul nas Figuras 34 e 35.

Figura 34. Estimativa do potencial de geração de energia no setor sucroalcooleiro – região Sudeste.

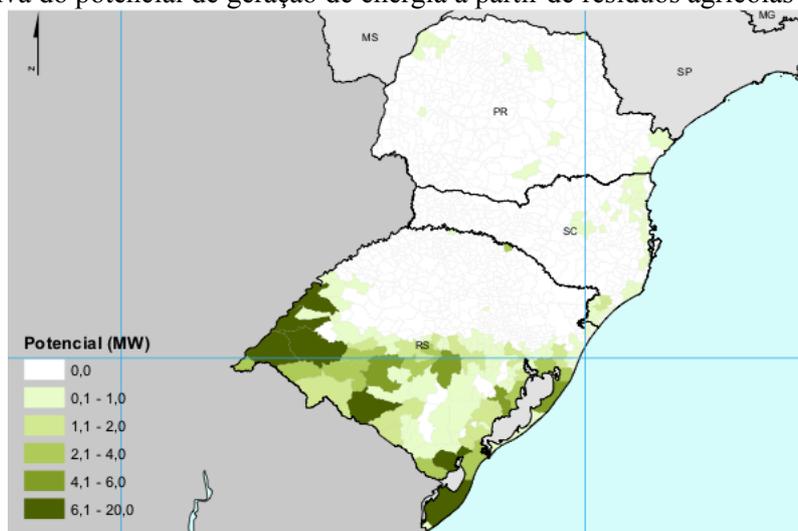


Fonte: Coelho et al (2012).

Na região Sudeste, conforme Figura 34, há potencial principalmente no setor sucroalcooleiro com destaque para o estado de São Paulo, porém em todos os estados da região há potencial, atingindo até 80 MW.

Na Figura 35, observa-se o mapa com estimativa de potencial a partir de resíduos agrícolas, com destaque para o Rio Grande do Sul, atingir em algumas regiões até 20 MW.

Figura 35. Estimativa do potencial de geração de energia a partir de resíduos agrícolas - região Sul.



Fonte: Coelho et al (2012).

Em outras tipologias e/ou classes de consumo, os projetos de cogeração devem ser incentivados, como sistemas de vapor e água quente (caldeiras) em indústrias, hospitais, restaurantes, lavanderias, hotéis, entre outros. Dentre os benefícios destacam-se a redução do consumo de energia, redução de demanda no horário de ponta e maior redução de emissões em relação às demais ações de eficiência energética. O módulo 4 do PROPEE (ANEEL, 2013a) pode ser alterado, incluindo aumentando o limite de potência instalada das ações de geração de energia com fonte incentivada, hoje restrita à 1 MW.

Quanto às ações de eficiência energética 2 e 3, recomenda-se o investimento em projetos especiais que representem ganho direto à eficiência operacional das concessionárias, como identificação e redução de perdas técnicas, comerciais e inadimplências, e a utilização da eficiência energética para atenuá-las, justificadas por IAB (2017), indicando taxas de perdas de até 28,1 % de perdas comerciais em 2015 de concessionárias no Brasil. Execução de projetos especiais na área do comportamento do uso, desenvolvimento de *software* para determinação de RCB e submissão e gestão dos projetos.

As ações na área de condicionamento ambiental, incluem projetos de ar condicionado e aquecimento, que podem ser atendidos por projetos de diversas tipologias: aquecimento solar, baixa renda, residencial, comércio e serviços. Sugere-se estender o escopo de atuação, permitindo obras civis e não apenas a substituição de equipamentos como ação de eficiência energética, para atender projetos que incluam intervenção na envoltória das edificações.

A AEE aquecimento solar de água, poderia ser disseminada em outras classes de consumo, como em processos de pré-aquecimento em sistemas de recuperação de calor e caldeiras em indústrias, hospitais, restaurantes, lavanderias, hotéis, entre outros.

A iluminação é o uso final com maior participação em projetos no PEE, porém a tipologia iluminação pública apresenta-se com o menor número de projetos (à frente da tipologia lado da oferta), apenas 4, representando 0,24 % do total. Deve-se ressaltar, o grande potencial dessa tipologia, direcionada exclusivamente, às administrações municipais, cujo horário de funcionamento é inteiramente dentro do horário de ponta.

A AEE 7, bônus para eletrodomésticos eficientes, consiste na compra incentivada de aparelhos eletrodomésticos mais eficientes, compartilhando custos com o consumidor final e ampliando o escopo de atuação, sugere-se que um percentual mínimo do valor a ser investido nas chamadas públicas seja aplicado na tipologia residencial, nessa AEE, como forma de aumento da visibilidade do PEE, atingindo outros consumidores residenciais, além dos de baixa renda.

Os sistemas motrizes consomem cerca de 47 % da eletricidade produzida no Brasil, portanto tal uso final deve receber ações em caráter prioritário, uma das AEE pode ser a implementação de bônus para a substituição por motores de alto rendimento. De acordo com Silva *et al.* (2014), os sistemas motrizes representam uma parcela substancial da eletricidade consumida pelo setor industrial. Por isso, eles constituem um instrumento interessante para a divulgação de uma cultura eficiente em termos de energia, operacionalizada por padrões mínimos de eficiência, no Brasil, um conjunto obrigatório de tais padrões foi publicado em 11 de dezembro de 2002, resultando na comercialização de motores IE4 (*super premium*), de acordo com o padrão IEC 60034-30.

A gestão energética é prevista no PROPEE como uma AEE, podendo os projetos serem selecionados, diretamente, pela concessionária ou por meio de chamada pública (ANEEL, 2013). Embora o PROPEE recomende a utilização da norma ISO 50001/2011, como referência para os projetos, não há correlação direta com a certificação da unidade consumidora na referida norma, portanto sugere-se que a implantação de sistemas de gestão nas unidades consumidoras contempladas com os recursos do PEE, e que esse sistema esteja ativo caso a UC submeta-se ao pleito de novo projeto. Deve-se ressaltar, conforme citado por Guardia *et al.* (2010), que atividades de gerenciamento de energia apresentam baixo custo de energia economizada em relação as demais.

O incentivo à realização de diagnósticos energéticos deve ser realizado, segundo Steg *et al.* (2018), diagnósticos energéticos são estratégias mais eficientes que incentivos

financeiros, e Bajay *et al.* (2018) citam que na Alemanha, os diagnósticos energéticos serão obrigatórios para grandes empresas a partir de 2020.

Quanto ao item 10, relativo à capacitação de gestores e técnicos das unidades consumidoras, caracterizado como uma ação de grande relevância em relação ao aumento na participação do programa, assim como em relação à qualidade dos projetos executados. Como proposta de ação, sugere-se a disseminação de informação e certificação técnica para os responsáveis técnicos das unidades consumidoras de tipologias com maior consumo de energia, como industrial, poder público, comércio e serviços, serviços públicos, entre outras. Objetivando a compreensão do que a eficiência energética representa, bem como os mecanismos para atingir o melhor desempenho energético dos diversos processos, por meio das técnicas de medição e verificação de desempenho, gestão energética e certificação energética de edificações, além de preparar as unidades consumidoras para as chamadas públicas de projeto. Porém, para tanto torna-se necessária a ampliação do escopo da tipologia educacional, pois atualmente de acordo com o PROPEE, a atuação restringe-se a escolas do ensino formal públicas ou privadas, estendendo-se a projetos de divulgação dos hábitos de uso eficiente de energia nos órgãos de comunicação ou outros meios adequados para tal (ANEEL, 2013).

A metodologia de medição e verificação é o instrumento chave para a atribuição de valor monetário às ações de eficiência energética, dessa forma é imprescindível o conhecimento da metodologia por todos os agentes envolvidos, sob o risco, de não concordância com os resultados após execução do projeto, outra provável fonte de barreiras ao programa. Recomenda-se a priorização por ações de eficiência energética com clara viabilidade de realização de medição e verificação.

Embora o PEE contemple a AEE de gestão energética, o PROPEE ainda não considera ações para potencial certificação de edificações com base no PBE Edifica, dessa forma, tratando-se de programas de iniciativa pública, sugere-se a inserção deste como uma tipologia ou ação de eficiência energética, atendendo o escopo atual da certificação de edificações públicas, comerciais e de serviços.

As ações para reduzir barreiras são fundamentais para o sucesso do programa. De acordo com Vine *et al.* (2003) e Apajalathi *et al.* (2015), projetos com execução falha ou resultados ruins, geram desconfiança entre os usuários e incerteza quanto ao desempenho. Essas barreiras podem ser combatidas com resultados transparentes e garantidos com metodologias certificadas e ampla divulgação dos resultados entre os grupos específicos de classes de consumidores.

Atualmente de acordo com a resolução normativa 556/2013, que estabelece o investimento de 50 % da obrigação legal de investimento nas duas classes de consumo com maior participação no mercado (ANEEL, 2013), recomenda-se a aplicação dos recursos de acordo com os potenciais locais de ações de eficiência energética e classes de consumidores. Recomenda-se ainda, que caso o saldo da chamada pública de projetos não seja totalmente executado, que o mesmo seja investido na tipologia poder público.

5.2. Análise modelo do cálculo de viabilidade

Melhorias no modelo de cálculo de viabilidade podem contribuir significativamente para a redução de barreiras a execução do PEE, segundo Vine *et al.* (2003) e Apajalahti *et al.* (2015), identificam a incerteza de desempenho e a desconfiança entre usuários finais de energia, como barreiras a aceitação dos programas de eficiência energética.

Em relação ao cálculo de viabilidade, apresentado no capítulo 2, destacam-se as equações (5) e (6), relativas ao Fator de recuperação de capital e aos benefícios anualizados, respectivamente. O fator de recuperação de capital e taxa de desconto são a base do modelo de viabilidade econômica utilizada no PEE, associada à vida útil dos equipamentos, a qual, segundo o PROPEE, a vida útil deverá ser definida com base nos dados fornecidos pelo fabricante do equipamento ou estudo que apure, de forma confiável esse tempo de vida, a ser realizado por iniciativa da ANEEL. E, caso sejam utilizados os dados do fabricante, a ANEEL poderá solicitar à empresa catálogo técnico que os comprove (ANEEL, 2013). Porém, apenas o valor da vida útil é frágil ao se considerar a depreciação da eficiência dos equipamentos durante a vida útil, principalmente em relação a sistemas mecânicos, como motores elétricos, compressores, bombas hidráulicas entre outros. Com o modelo atual, pode ocorrer uma sobrevalorização da energia economizada, pois o modelo atual apresenta fraca correlação com o índice de depreciação dos equipamentos e o rendimento energético destes.

Quanto ao modelo de benefício anualizado, considerando-se a indissociabilidade entre a eficiência energética e meio ambiente, assim como as metas propostas pelo país na COP 21 (BRASIL, 2015), deve-se considerar a redução de emissões em seu modelo, sugere-se a inclusão das reduções de emissões na equação para determinação dos benefícios anualizados, adicionando o termo a equação.

As metas das concessionárias em relação à execução do PEE são percentuais da receita operacional líquida, e não a economia de energia e redução de demanda no horário de ponta,

ocasionando a busca por parte das concessionárias da execução financeira dissociada dos objetivos de eficiência energética.

Deve-se priorizar as estratégias para disseminação da medição e verificação, dentre outras para atribuir e valorizar os projetos de eficiência energética, até mesmo a evolução do mecanismo de chamadas públicas para o modelo de mercado de certificados brancos apresentado por Caldeira (2016).

5.3. Análise de requisitos para um novo sistema de análise e gestão de projetos

O desenvolvimento de um sistema para elaboração e gestão de projetos para o Programa de Eficiência Energética, contribuirá em todos os níveis de atuação dos atores envolvidos. Para as unidades consumidoras, proporcionará, auxílio na fase de projeto e tomada de decisão em relação as ações de eficiência energética; para as concessionárias, deve-se incluir os critérios de seleção e habilitação dos projetos das chamadas públicas, gestão dos projetos em execução, além da análise dos impactos das AEE na rede de distribuição; para a ANEEL, representa uma ferramenta para gestão e avaliação dos projetos, com uma base de dados rica em conhecimento para tomadas de decisão futuras. O ponto comum está na possibilidade de redução de erros na entrada e processamento de dados, bem como a formação de base dados dos projetos executados. Um sistema especialista, conforme proposto, é uma estratégia para o combate as barreiras citadas por Vine *et al.* (2003) e Apajalathi *et al.* (2015).

Os EUA e UE possuem sistemas próprios para seus programas de eficiência energética, além de determinar a viabilidade dos projetos, têm a função de armazenar informações de projetos executados e o gerenciamento das economias de energia, na Tabela 31, citam-se alguns exemplos.

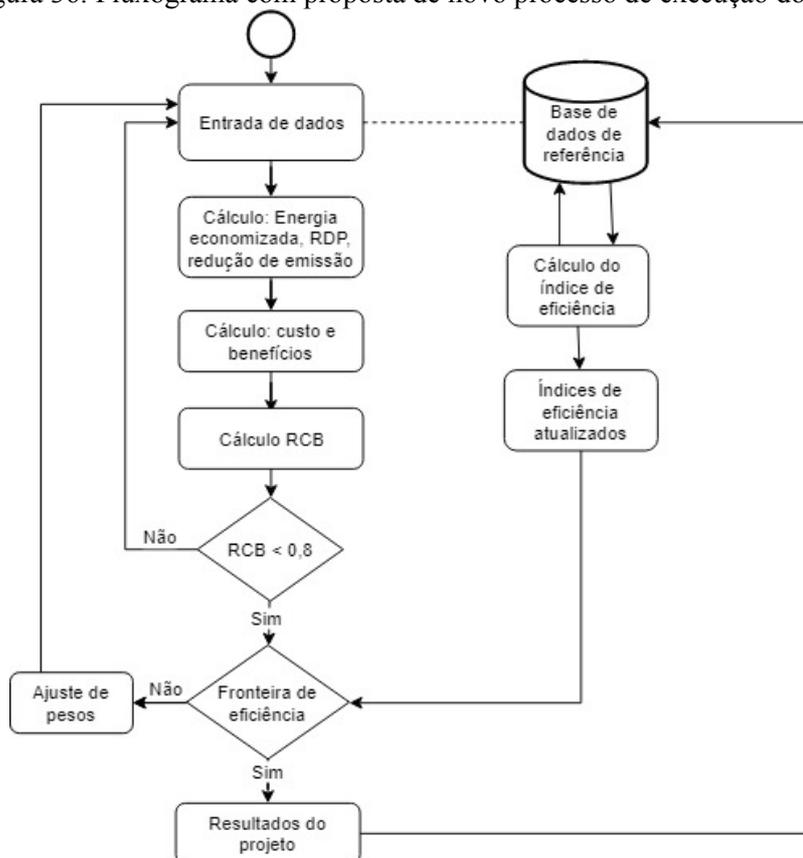
Tabela 31. Sistemas para projetos de eficiência energética internacionais.

Sistema	Aplicação	País	Referências
E3	Cálculo de viabilidade econômica, <i>off-line</i> . Projetos do CPUC, Califórnia. Base de dados de projetos anteriores.	EUA	www.ethree.com ; www.cpuc.ca.gov/egyefficiency
eeMeasure	Base de dados de projetos de eficiência energética <i>online</i> , desenvolvidos pelo programa ICT <i>Policy Support Programme</i> da União europeia.	UE	eemeasure.smartspaces.eu/
DEEP	<i>De-Risking Energy Efficiency Platform</i> (DEEP), é uma iniciativa de código aberto <i>online</i> , para aumentar os investimentos em eficiência energética na Europa por meio da melhor partilha e análise transparente de projetos existentes em Edifícios e Indústria, contém dados de mais de 7800 projetos.	UE	deep.eefig.eu
multEE	visa melhorar a consistência e a qualidade do planejamento, implementação e monitoramento de políticas de eficiência energética entre diferentes níveis administrativos entre os países da União europeia.	UE	multee.eu

Fonte: Elaborada pelo autor.

A visualização do processo do sistema proposto é representada utilizando fluxograma que é uma representação gráfica da série de atividades que definem o sistema, conforme a Figura 36.

Figura 36. Fluxograma com proposta de novo processo de execução do PEE.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema proposto deve prever três níveis de acesso, para os consumidores, concessionárias e agência reguladora, no caso a ANEEL.

O sistema proposto baseia-se no modelo utilizado atualmente pelo PEE, porém, com a inserção do modelo DEA, e um módulo de decisão, atuando na comparação com a fronteira de eficiência, utilizada como referência. A base de dados de referência, também deve ser incorporada para a disponibilização dos dados de projetos armazenados.

Os dados de entrada, devem ser os mesmos utilizados atualmente pelo modelo PEE, no entanto, sugere-se a inserção de dados para contribuir com o auxílio aos atores. Por exemplo, a inclusão da localização geográfica é importante, permitindo a inserção dos resultados obtidos no planejamento do sistema de distribuição da concessionária, por meio de estudos de impacto das AEE na operação do sistema, tais como o carregamento e variação de tensão nos alimentadores, contribuindo, também, para avaliação prévia de potencial utilização de fontes incentivadas para geração de energia, com melhor potencial na região de localização do projeto.

As equações para calcular a energia economizada e redução de demanda no horário de ponta devem ser mantidas. Sugere-se incluir o cálculo da redução de emissões de gases estufa

proporcionada pelas ações de eficiência energética, Calili *et al.* (2015) e Vieira *et al.* (2017) desenvolveram modelos para estimar tais reduções, utilizando como estudo de caso o Brasil.

A equação do benefício anualizado deve incluir a redução de emissões. Em relação ao custo anualizado, a sugestão exposta no item 5.2, quanto ao vida útil dos equipamentos e sua influência no fator de recuperação de capital deve ser considerada e analisada.

A etapa de determinação da relação custo benefício deve utilizar o modelo atual.

Para a etapa de cálculo dos Indicadores de eficiência, deve utilizar o modelo desenvolvido nessa tese, apresentada no capítulo 3.

A base de dados de referência, deve conter os dados dos projetos executados pelo PEE, com a finalidade comparativa, atualização do cálculo dos indicadores de eficiência das tipologias, bem como, outras técnicas e finalidades de extração de conhecimento da base de dados.

5.4. Considerações finais

A partir dos dados obtidos no capítulo 4, alterações no Programa de Eficiência Energética foram inferidas, e a proposta de um sistema para elaboração de projetos de eficiência energética foi apresentado nesse capítulo.

A potencialização das ações de eficiência energética em relação as tipologias e classes de consumo é necessária. Recomenda-se como principal eixo os projetos educacionais, porém, diferente do previsto atualmente, direcionados à qualificação dos recursos humanos das unidades consumidoras, como estratégia para aumento da participação nos programas (PEE e Procel), bem como, aumentar o desempenho das instalações. Sugere-se a implantação de sistemas de gestão energética para os projetos contemplados com financiamento do PEE. Para redução de barreiras ao programa, o ganho a todos os agentes deve ser priorizado. Projetos especiais para redução de perdas técnicas e comerciais devem ser incentivados.

O Brasil apresenta potencial para a cogeração de energia, no entanto, mesmo com excelente desempenho dos projetos executados até o momento, esta tipologia, têm baixa participação no PEE. A divulgação específica do programa para as classes de consumo deve ser incentivada.

O modelo de cálculo de viabilidade deve ser revisto, quanto a vida útil dos equipamentos e conseqüentemente dos projetos, e quanto a utilização das reduções de emissões como benefícios anualizados.

O desenvolvimento de um sistema específico para elaboração e gestão dos projetos, agregará valor aos projetos, e ao próprio programa de eficiência energética.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a priorização das tipologias de projetos pode otimizar a energia economizada e redução de demanda no horário de ponta dos projetos submetidos ao Programa de Eficiência Energética. A definição e utilização de indicadores contribuiu para o melhor desempenho alcançado pelos projetos. Os resultados indicam que a tipologia do projeto e, conseqüentemente, as medidas para a eficiência energética são diversas e torna-se fundamental considerar essa diversidade no modelo de priorização de medidas do Programa de Eficiência Energética.

A eficiência energética no setor de distribuição de energia elétrica foi abordada, apresentando a contextualização das ações no sistema, caracterizado pela necessidade de energia renovável, segura e eficiente, em um ambiente com avanço tecnológico impulsionado pela expansão das redes de distribuição inteligentes, assim como o aumento da geração distribuída, alterando a papel do consumidor, constituindo agora uma nova unidade de geração de energia. Nesse cenário surgem novos agentes de mercado e novas estratégias de formação de preço da energia elétrica, aumentando a relevância da eficiência energética. Os múltiplos benefícios da eficiência energética foram apresentados, com destaque para a sua influência no PIB, preço da energia e geração de empregos. Diversas barreiras ao sucesso na implantação de políticas também foram identificadas, assim como a classificação dos comportamentos dos usuários, necessária para a redução do Efeito Rebote, e conseqüentemente o aumento do impacto das ações de eficiência energética.

As políticas e programas de eficiência energética no setor de distribuição de vários países foram apresentadas, assim como os programas brasileiros. O surgimento dos programas baseados na obrigação com a eficiência energética foi abordado, com destaque para as diretivas da União Europeia, e como exemplo cita-se a França que alcançou uma economia de energia de 5,4 % em decorrência de projetos EEO. Apresentou-se mecanismos, como *White certificates* e EEPS, bastante difundidos na última década. A importância da eficiência energética em edificações como estratégia internacional foi abordada, bem como a evolução para as edificações com consumo médio nulo da energia da rede de distribuição. A Alemanha destaca-se internacionalmente, como o país que mais investe em eficiência energética no mundo.

O caso Brasileiro foi apresentado, destacando o Procel e os resultados dos trinta anos de atuação, com investimento de US\$ 862 milhões proporcionando 102 TWh de energia economizada. Evidenciou-se quase duas décadas de legislação específica para a eficiência energética no Brasil e o Programa de Eficiência Energética regulado pela ANEEL e executado

pelas concessionárias de energia elétrica foi apresentado, bem como, o detalhamento do modelo do cálculo da relação custo benefício.

Considerando o Programa de Eficiência Energética como o objeto de estudo dessa tese, a metodologia desenvolvida foi apresentada. As etapas foram detalhadas com destaque para o modelo de determinação de índices de eficiência e classificação dos projetos, com função objetivo de minimização dos custos totais de energia economizada e maximização da economia de energia e redução da demanda no horário de ponta, através da análise por envoltória de dados.

Os resultados apresentados, inferem que a energia economizada pelos projetos do PEE no período analisado concentra-se na região Sudeste com 56,19 %, em contraponto, na região Norte apenas 2,83 %. A energia economizada *per capita*, acompanha os resultados regionais, no Sudeste verificou-se a economia de 30,69 kWh/ano/habitante, enquanto, na região Norte 7,83 kWh/ano/habitante.

Em relação às tipologias, baixa renda e poder público possuem o maior número de projetos, com 26,89 % e 25,16 % respectivamente do total de projetos. Cogeração e baixa renda, apresentam maior taxa de energia economizada por projeto. A tipologia cogeração destaca-se também como a melhor redução de demanda no horário de ponta, com 2,36 MW/projeto, seguido, também, por projetos baixa renda com 2,07 MW/projeto. Deve-se ressaltar que a tipologia iluminação pública, mesmo com operação em coincidência com horário de ponta, apresentou baixa taxa de redução por projeto, 292,97 kW/projeto, de forma semelhante, a tipologia industrial, com 190,81 kW/projeto.

A tipologia industrial destaca-se com o menor custo total para a energia economizada, com 184,92 U\$/MWh.ano. Quanto ao RCB, o menor valor verificado, 0,24, realizado pela tipologia rural, seguido, pelas tipologias industrial e cogeração, com 0,51.

De acordo com o modelo proposto, as melhores tipologias são industrial e cogeração, e entre as tipologias ineficazes, existem 95,76 % do total de projetos executados e 94,72 % dos investimentos aplicados até o momento. Indicando que os resultados do PEE podem ser melhor aproveitados e potencializados, com o estabelecimento de metas, como indicadores a partir das informações dos projetos elaborados anteriormente.

A potencialização das ações de eficiência energética em relação as tipologias e classes de consumo é necessária, recomenda-se como principal eixo os projetos educacionais, porém, diferente do previsto atualmente, direcionados à qualificação dos recursos humanos das unidades consumidoras, como estratégia para aumento da participação nos programas (PEE e Procel), bem como, aumentar o desempenho das instalações. A implantação de sistemas de

gestão energética deve ser considerada para os projetos contemplados com financiamento do PEE. Para redução de barreiras ao programa, o ganho a todos os agentes deve ser priorizado. Projetos especiais para redução de perdas técnicas e comerciais devem ser incentivados.

O Brasil apresenta potencial para a cogeração de energia, no entanto, mesmo com excelente desempenho dos projetos executados até o momento, esta tipologia, têm baixa participação no PEE. A divulgação específica do programa para as classes de consumo deve ser incentivada.

O modelo de cálculo de viabilidade deve ser revisto, quanto a vida útil dos equipamentos e consequentemente dos projetos, e quanto a utilização das reduções de emissões como benefícios anualizados.

O desenvolvimento de um sistema específico para elaboração e gestão dos projetos, agregará valor aos projetos, e ao próprio programa de eficiência energética. Com o sistema proposto, pode-se disseminar os resultados dos projetos executados, apresentando suas características técnicas e de viabilidade econômica. São necessárias mais informações sobre os projetos para realizar uma análise melhor, as variáveis coletadas devem ser caracterizadas de forma a que possam ser quantificadas e / ou qualificadas objetivamente - por exemplo, através da inserção de indicadores e pesos - para permitir uma melhor análise de dados e, consequentemente, melhor tomada de decisões no futuro.

Com os resultados apresentados, conclui-se que a eficiência energética não é uma fonte, sobretudo por não ser despachável, mas um recurso e estratégia indispensável, principalmente no sistema de distribuição de energia elétrica. Com extrema relevância nos sistemas de geração distribuída, e no advento das usinas virtuais, a partir dos avanços das tecnologias de armazenamento, e resposta da demanda, compondo um ambiente de mercado em que as empresas de distribuição tornam-se fornecedoras de serviços, inclusive eficiência energética.

A utilização da metodologia desenvolvida, auxilia a tomada de decisão por parte da agência reguladora, quanto a revisão de estratégias futuras para o programa de eficiência energética, evitando o direcionamento do programa para tipologias e classes de consumidores com menor potencial de economia de energia e redução de demanda no horário de ponta.

O Programa de Eficiência Energética não deve ser utilizado como ação beneficente, exceto as ações previstas pelo impacto social, porém, com justificativa técnica, incluindo retorno ao sistema de distribuição, como a intervenção e substituição de instalações elétricas inadequadas. A execução de projetos com abordagem voltada apenas para ação social e divulgação da concessionária, não agrega valor, ao contrário provoca barreiras. Os benefícios

da eficiência energética devidamente medidos e verificados, tem valor de mercado, e os mecanismos para garantir, certificar, distribuir e gerenciar este valor, devem ser regulados.

Portanto, a contribuição dessa tese esta na proposição de uma metodologia para determinação de indicadores e classificação dos projetos do Programa de Eficiência Energética brasileiro. Podendo ser aplicado imediatamente para auxílio a tomada de decisão quanto as novas ações do programa, e adicionada a um sistema computacional como parâmetro para otimização dos resultados dos projetos de eficiência energética.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

A partir dessa tese, alguns temas podem ser abordados para a continuidade da pesquisa, destaca-se:

- Análise do impacto dos projetos de eficiência energética no preço final da energia elétrica ao consumidor;
- Avaliação de impacto das ações de eficiência energética nos alimentadores do sistema de distribuição e demais benefícios a eficiência operacional do sistema de distribuição de eletricidade;
- Modelo para análise da redução de emissões de gases estufa e quantificação dos seus ganhos aos benefícios anualizados;
- Modelo considerando a depreciação dos equipamentos utilizados como ação de eficiência energética.

REFERÊNCIAS

ABRARDI, L.; CAMBINI, C. Tariff regulation with energy efficiency goals. *Energy Economics* 2015, 49, 122-131, DOI: 10.1016/j.eneco.2015.01.017.

AGUERO, J. R.; KHODAEI, A.; MASIELLO, R. The Utility and Grid of Future: Challenges, Needs, and Trends. *IEEE Power and Energy Magazine*, September/October, 2016.

ALVAREZ, F.; RUDNICK, H. Impact of energy efficiency incentives on electricity distribution companies. *IEEE Transactions on Power Systems* 2010, 25, 1865-1872, DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2045162.

ANEEL. Programa de Eficiência Energética – Gestão do Programa. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível *online*: <http://www.aneel.gov.br/pt/programa-eficiencia-energetica/>. (acessado em 03/05/2016).

_____. Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Julho, 2013a.

_____. Resolução normativa nº 300. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Fevereiro, 2008.

_____. Resolução normativa nº 556. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Junho, 2013b.

APAJALAHTI, E.L.; LOVIO, R.; HEISKANEN, E. From demand side management (DSM) to energy services: A Finnish case study. *Energy Policy* 2015, 81, 76-85, DOI: 10.1016/j.enpol.2015.02.013.

BAJAY, S.; JANNUZZI, G.M.; HEIDEIER, R.B.; VILELA, I.R.; PACCOLA, J.A.; GOMES, R. Geração distribuída e eficiência energética: Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro. IEI Brasil, Campinas, 2018.

BCB. Relatório de inflação. Banco Central do Brasil. Volume 19, número 4, dezembro 2017.

BEHRANGRAD, M. A review of demand side management business models in the electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, 47, 270-283, DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.033.

BRASIL. Balanço Energético Nacional 2009 ano 2008. Empresa de Pesquisa Energética, EPE 2009.

_____. Balanço Energético Nacional 2015 ano 2014. Empresa de Pesquisa Energética, EPE 2015.

_____. *Intended Nationally Determined Contribution of Brazil*. Towards achieving the objective of the United Nations framework conventions on climate change, France, 2015.

_____. Lei 9.991 de 24 de julho de 2000. Presidência da República, 2000.

_____. Lei 11.465 de 28 de março de 2007. Presidência da República, 2007.

_____. Lei 13.203 de 08 de dezembro de 2015. Presidência da República, 2015.

_____. Medida Provisória 2.198-4, 27 de Julho de 2001. Presidência da República, 2001.

_____. Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e diretrizes básicas. Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2011.

CALDEIRA, R. White Certificates: uma Proposição para Aumentar os Níveis de Eficiência Energética no Setor Elétrico Brasileiro. Universidade de São Paulo, 2016.

CALILI, R.F.; SOUZA, R.C.; GALLI, A.; ARMSTRONG, M.; MARCATO, A.L. Estimating the cost savings and avoided CO2 emissions in Brazil by implementing energy policies. *Energy Policy*, 2014, 67, 4-15, DOI: 10.1016/j.enpol.2013.09.071.

CHEN, S.; ZHANG, S. Large-Scale land use for construction and energy consumption after the new millennium with their impact on total factor efficiency change in China's regional economy. *Energies*, 2014, 7, 1986-2003, DOI: 10.3390/en7041986.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; KARNIOL, M. R. Atlas de Bioenergia do Brasil. Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 721606/2009 – MME, São Paulo, 2012.

COLIN, E. C. Pesquisa Operacional: Aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas, 2ª edição. Atlas, 2017.

FAWCETT, T.; ROSENOW, J.; BERTOLDI, P. The Future of Energy Efficiency Obligation Schemes in the Europe Union. ECEEE Summer Study Proceedings, 2017.

FORFIA, D.; KNIGHT, M.; MELTON, R. The View from the Top of Mountain. IEEE Power and Energy Magazine, May/June, 2016.

UN. Framework Convention on Climate Change: Twenty first session conference of the parties. United Nations, France, 2015.

GAMA, J., CARVALHO, A. P., FACELI, K., LORENA, A. C., OLIVEIRA, M.: Extração de Conhecimento de Dados. Silabo. Vol. 2, 351—360, 2015.

GUARDIA, E.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L.; AKIRA, R. Oportunidades de eficiência energética para indústria: uma visão institucional. CNI, ISBN: 978-85-795-046-9, 2010.

IAB. Perdas comerciais e inadimplência no setor elétrico. White Paper 18. Instituto Acende Brasil, São Paulo, 40 p, 2017.

IBGE. Aspectos demográficos, ano 2010. IBGE/DPE/Departamento de População e Indicadores Sociais. Divisão de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível *online*:<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/indicadoresminimos/tabela1.shtm>. (acessado em 15/12/2017).

ICF. Energy Efficiency as a Low-Cost Resource for Achieving Carbon Emissions Reductions. National Action Plan for Energy Efficiency 2009, ICF International, Inc, USA.

IEA. Technology Roadmap. Smart Grids. OECD, International Energy Agency, IEA, France, 2011.

____. Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency. OECD, International Energy Agency, IEA, France, 2014.

____. Energy Efficiency Market Report 2016. OECD, International Energy Agency, IEA, France, 2016.

____. Energy Efficiency Market Report 2017. OECD, International Energy Agency, IEA, France, 2017.

ISO. The ISO Survey of Management System Standard Certifications 2016. International Organization for Standardization, ISO, 2017.

KALLAKURI, C.; VAIDYANATHAN, S.; KELLY, M.; CLUETT, R. The 2016 International Energy Efficiency Scorecard. Report E1602, American Council for Energy Efficiency Economy, ACEEE, USA, July, 2016.

KERR, N.; GOULDSON, A.; BARRET, J.; The Rationale for Energy Efficiency Policy: Assessing the Recognition of the Multiple Benefits of Energy Efficiency Retrofit Policy. Energy Policy, Vol. 106, 2017.

KOK, K.; WIDERGREN, S. A Society of Devices: Integrating Intelligent Distributed Resources with Transactive Energy. IEEE Power and Energy Magazine, May/June, 2016.

LEE, Y.S.; TONG, L.I. Predicting high or low transfer efficiency of photovoltaic systems using a novel hybrid methodology combining rough set theory, data envelopment analysis and genetic programming. Energies 2012, 5, 545-560, DOI: 10.3390/en5030545.

MELLO, J.C.; MEZA, L.A.; GOMES, E.G.; BIONDI NETO, L. Curso de análise de envoltória de dados. SBPO, Gramado, Setembro, 2005.

OH, S.C.; HILDRETH, A.J. Estimating the technical improvement of energy efficiency in the automotive industry – Stochastic and deterministic frontier benchmarking approaches. *Energies* 2014, 7, 6196-6222, DOI: 10.3390/en7096196.

OLIVEIRA, R.C; SILVA, R.D.S; TOSTES, M.E.L. A methodology for analysis of cogeneration projects using oil palm biomass wastes as an energy source in the Amazon. *Dyna*, vol. 82, num. 190, abril, 2015, pp. 105-112.

PROCEL. Resultados PROCEL 2017-Ano base 2016. Eletrobras 2017. Disponível *online*: <http://www.procelinfo.com.br> (acessado em 15/09/2017).

PACUDAN, R.; GUZMAN, E. Impact of energy efficiency policy to productive efficiency of electricity distribution industry in the Philippines. *Energy Economics* 2002, 24, 41-54.

PÉREZ-ARRIAGA, I.J.; BATLLE, C.; GÓMEZ, T.; CHAVES, J.P.; RODILLA, P.; HERRERO, I.; DUEÑAS, P.; VERGARA RAMÍREZ, C.R.; BHARATKUMAR, A.; BURGER, S.; HUNTINGTON, S.; JENKINS, J.; LUKE, M.; MILLER, R. Utility of the Future: an MIT Energy Initiative response to an industry in transition. Project: UOF-MIT. Massachusetts Institute of Technology. Dec/2016.

PINHEIRO, T.M.M. Regulação por Incentivo à Qualidade: Comparação de Eficiência entre Distribuidoras de Energia Elétrica no Brasil.. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 2012.

ROSENOW, J.; BAYER, E. Costs and Benefits of Energy Efficiency Obligations: A review of European Programmes. *Energy Policy* 107, pp. 52-63, 2017.

ROSENOW, J. Energy savings obligations in the UK – A history of change. *Energy Policy* 2012, 49, 373-382, DOI: 10.1016/j.enpol.2012.06.052.

SCHOLOMANN, B.; EICHHAMMER, W.; REUTER, M.; FROLICH, C.; TARIQ, S. Energy efficiency: trends and policies in Germany. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Germany, November, 2015.

SILVA, R.D.S; TOSTES, M.E.L. Ten Years of Minimum Efficiency Standards for Induction Motors in Brazil: From Standards Class until Super Premium Motors. *Journal of Energy and Power Engineering*, v. 8, p. 1620-1632, 2014.

SLAZVIK, J.; CSETE, M. Climate and Energy Policy in Hungary. *Energies* 2012, 5, 494-517, DOI: 10.3390/en5020494.

STEG, L.; SHOWN, R.; DIETZ, T. What Drives Energy Consumers? *IEEE Power and Energy magazine*. 2018.

THOYRE, A. Energy efficiency as a resource in state portfolio standards: Lessons for more expansive policies. *Energy Policy* 2015, 86, 625-634, DOI: 10.1016/j.enpol.2015.08.015.

THOLLANDER, P.; PALM, J. Industrial energy management decision making for improved energy efficiency – Strategic system perspectives and situated action in combination. *Energies* 2015, 8, 5694-5703, DOI: 10.3390/en8065694.

URGE-VORSATZ, D. et al. (2010), Employment Impacts of a Large-Scale Deep Building Energy Retro t Programme in Hungary, report prepared by 3CSEP (Center for Climate Change and Sustainable Energy Policy) for the ECF (European Climate Foundation), ECF, Brussels, http://3csep.ceu.hu/sites/default/files/eld_attachment/project/node-6234/employment-impactsofenergyeciencyretro ts.pdf (acessado em 25 de janeiro de 2018).

VASCONCELOS, M.V.L. Análise de custo-benefício da implantação das redes elétricas inteligentes nas concessionárias de distribuição de energia elétrica do Brasil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM- 648/16, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

VIEIRA, N. D. B., NOGUEIRA, L. A. H., HADDAD, J. An assessment of CO2 emissions avoided by energy-efficiency programs: A general methodology and a case study in Brazil. *Energy*, 142, Elsevier, 2017. doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.072.

VINE, E.; HAMRIN, J.; EYRE, N.; CROSSLEY, D.; MALONEY, M; WATT, G. Public policy analysis of energy efficiency and load management in changing electricity businesses. *Energy Policy* 31, 2003.

WELLS, L.; RISMANCHI, B.; AYE, L. A Review of Net Zero Energy Buildings with Reflections on the Australian Context. *Energy and Buildings*, 158, 2018.

WERFF, E.; THOGERSEN, J. ; BRUIN, W.B. Changing Household Energy Usage. *Power and Energy Magazine*. 2018.

WÜNSCH, M. et al. (2014), Benefits of Energy Efficiency on the German Power Sector, Agora Energiewende, Berlin, www.agora-energiewende.org/leadadmin/downloads/publikationen/Studien/Energieeffizienz/Agora_ECF_RAP_System_Benefit_Study_short_version_web.pdf (acessado em 25 de janeiro de 2018).

ZENG, S.; XU, Y.; WANG, L.; CHEN, J.; LI, QIRONG. Forecasting the allocative efficiency of carbon emission allowance financial assets in China at the provincial level in 2020. *Energies* 2016, 9, 3-18, DOI: 10.3390/en9050329.

APÊNDICE A. TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A ELABORAÇÃO DA TESE

SILVA, R.D.S; TOSTES, M.E.L. Ten Years of Minimum Efficiency Standards for Induction Motors in Brazil: From Standards Class until Super Premium Motors. *Journal of Energy and Power Engineering*, v. 8, p. 1620-1632, 2014.

OLIVEIRA, R.C; SILVA, R.D.S; TOSTES, M.E.L. A methodology for analysis of cogeneration projects using oil palm biomass wastes as an energy source in the Amazon. *DYNA Medellin*, vol. 82, num. 190, p. 105-112, 2015.

SILVA, R.D.S; OLIVEIRA, R.C; TOSTES, M.E.L. Analysis of the Brazilian Energy Efficiency Program for Electricity Distribution Systems. *Energies*, v.10, p.1391-1410, 2017.

APÊNDICE B. TIPOLOGIAS DE PROJETO - DEFINIÇÕES

As Tipologias são definidas pelos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE, especificamente o Módulo 4, cuja última atualização data de 09/2013.

A base de dados utilizada contempla o período de 2008 a 2016, e algumas das Tipologias consideradas no período, atualmente são classificadas com Ações de Eficiência Energética.

- **Baixa renda:** ações que visam induzir o uso eficiente de energia em consumidores de baixa renda que são contempladas pela tarifa social de energia elétrica, cuja renda familiar per capita é inferior a 0,5 salário mínimo.
- **Iluminação pública:** ações em instalações de iluminação que atendem ruas, estradas, praças, semáforos, atendidas pelos municípios.
- **Projeto piloto:** projetos inéditos e promissores que visam consolidar alguma tecnologia ou prática de eficiência energética.
- **Comércio e serviços:** ações em unidades consumidoras com atividade comercial e prestação de serviços. Incluídas nessa tipologia também estão as entidades prestadoras de serviços sem fins lucrativos. É caracterizada pela contenção de diversas unidades consumidoras, como lojas, shoppings, escolas, universidades, hospitais, restaurantes, organizações não governamentais, entre outros.
- **Industrial:** São projetos focados em otimização de processos, introdução de motores eficientes, sistemas de gerenciamento de energia, entre outros, em unidades consumidoras industriais atendidas pela concessionária de energia elétrica, independentemente do porte da indústria.
- **Poder público:** ações em unidades consumidoras de órgãos públicos municipais, estaduais e federais. Atende prédios administrativos, escolas, universidades, hospitais, entre outros.
- **Residencial:** ações em unidades consumidoras residenciais e condomínios não classificados como projetos de baixa renda.
- **Rural:** projetos em unidades consumidoras com atividade rural.
- **Serviço público:** ações em unidades consumidoras de órgãos que prestam serviços públicos, como coleta, tratamento e abastecimento de água, coleta e tratamento de resíduos sólidos e sanitários, energia elétrica, gás, entre outros.

- **Aquecimento solar:** ações de implantação de sistemas de aquecimento solar de água, em substituição a processos que utilizam eletricidade para geração de calor.
- **Lado da oferta:** projetos voltados para a área de geração e distribuição de energia elétrica, principalmente por fontes incentivadas.
- **Cogeração:** ações em unidades consumidoras com potencial para implementar ações de cogeração de energia, classificadas como fonte incentivadas de geração de energia.
- **Educacional:** projetos que visam disseminar o conceito de eficiência energética e desenvolvimento sustentável.
- **Gestão municipal de energia:** projetos que visam melhorar a gestão do uso final de energia elétrica nos municípios.