

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO KLINGUELFUS

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS EM UM CENÁRIO DE
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

CURITIBA

2016

GUSTAVO KLINGUELFUS

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS EM UM CENÁRIO DE
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

CURITIBA

2016

K65a

Klinguelfus, Gustavo

Análise de viabilidade técnico-econômica de ações de eficiência energética em consumidores residenciais em um cenário de redes elétricas inteligentes / Gustavo Klinguelfus. – Curitiba, 2016.

122 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

Orientador: Alexandre Rasi Aoki .

Bibliografia: p. 120-122.

1. Redes elétricas inteligentes. 2. Energia elétrica – Consumo. 3. Energia elétrica – Racionamento. 4. Redes elétricas – Analisadores. 5. Política energética. I. Universidade Federal do Paraná. II.Aoki, Alexandre Rasi. III. Título.

CDD: 621.31

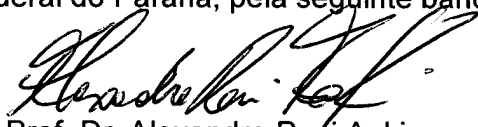
TERMO DE APROVAÇÃO

GUSTAVO KLINGUELFUS

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS EM UM CENÁRIO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

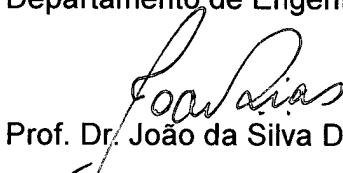
Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



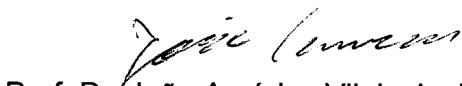
Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



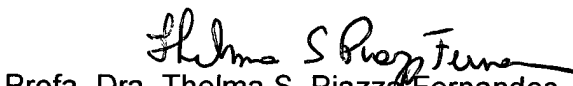
Prof. Dr. João da Silva Dias

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



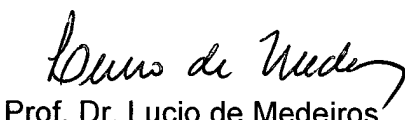
Prof. Dr. João Américo Vilela Junior

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



Profa. Dra. Thelma S. Piazza Fernandes

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



Prof. Dr. Lucio de Medeiros

Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Institutos Lactec

Curitiba, 20 de maio de 2016

À Elisa, minha esposa.

Ao Mateus, meu filho.

Aos meus pais, Mauro e Salete.

À minha irmã, Taline.

Por este trabalho, por quem eu sou e
tudo o que alcancei.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Alexandre Rasi Aoki, pela orientação, apoio, incentivo, confiança e sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus pais, Mauro e Salete, e minha irmã, Taline, por todo amor e carinho que sempre tiveram comigo.

À minha esposa, Elisa, por todo o apoio e a compreensão oferecida nos momentos em que eu necessitei dedicar-me aos estudos.

Ao meu filho, Mateus, que desde o ventre de sua mãe me serve de inspiração e incentivo para ser uma pessoa melhor.

Aos integrantes da banca, por todas as contribuições e sugestões.

Aos meus colegas de trabalho, em especial àqueles que me ajudaram com sua experiência e sabedoria durante a minha caminhada profissional.

Aos meus amigos, tanto os próximos quanto os distantes.

Aos meus colegas de sala.

À Secretaria do Curso.

De um modo especial, o meu reconhecimento à minha família, pois sem o apoio incondicional que me foi prestado seria muito difícil chegar ao ponto que cheguei e vencer mais este desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos.

Albert Einstein, 1935

RESUMO

Ações de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) são objeto de estudo desde meados da década de 1980. Com o advento das redes elétricas inteligentes, espera-se um grande avanço na disseminação de ações de GLD, uma vez que a “inteligência” da rede elétrica permite um volume de informações para o consumidor final sem precedentes, permitindo uma efetiva gestão do consumo de energia elétrica. Dentro deste contexto de gestão do consumo de energia elétrica, destaca-se o Programa de Eficiência Energética (PEE), no qual as distribuidoras de energia elétrica são obrigadas a aportar recursos em ações essencialmente de GLD. O PEE caracteriza-se como uma importante fonte de recursos para o aumento da eficiência energética do sistema elétrico, de forma que o presente trabalho objetiva definir e analisar uma metodologia para aplicação de tecnologias de redes elétricas inteligentes em consumidores residenciais, visando a execução de ações de eficiência energética. Para tanto foi levantado o arcabouço regulatório e das tecnologias com potencial de aplicação envolvendo o tema eficiência energética em redes elétricas inteligentes. Também foi realizada uma revisão da literatura, de modo a analisar publicações com grande relevância de forma a definir o estado da arte do tema. Partindo da metodologia padrão de cálculo de relação custo-benefício (RCB) definida para o PEE, foi desenvolvida uma metodologia para inserção de tecnologias relacionadas com redes elétricas inteligentes, consistindo de tomadas inteligentes e geração distribuída. De posse da metodologia para cálculo da RCB foram realizadas diversas simulações de modo a verificar a viabilidade destas ações em quatro tipos diferentes de consumidor: um representando a média dos consumidores de uma distribuidora (resultado de uma pesquisa de usos e posses de equipamentos), um perfil de baixo, médio e alto consumo. Através destes parâmetros foram realizadas simulações e foi delineado um cenário de viabilidade para aplicação destas tecnologias em consumidores residenciais. Ao variar os custos envolvidos nestas ações, pode-se observar uma sensível melhora na viabilidade com a redução de custos das tomadas inteligentes e da geração distribuída, uma vez que estas tecnologias estão em processo de amadurecimento, possuindo potencial para redução de preços no mercado. Mesmo com essa redução de custos não se chegou à viabilidade destas ações em termos de relação custo-benefício. A viabilidade das ações propostas somente foi atingida quando foram utilizadas outras fontes de recursos. Mesmo sendo o PEE a maior fonte nacional de recursos para eficiência energética, demonstra-se que somente estes recursos não são suficientes em termo de viabilidade técnico-econômica, sendo necessários aportes financeiros dos consumidores que serão beneficiados. Por fim, verifica-se que a viabilidade destas ações é maior em consumidores com perfil de alta elasticidade, apresentando um tempo de retorno desta contrapartida em um tempo menor.

Palavras-chave: Eficiência energética. Energia economizada. Gerenciamento pelo lado da demanda. Redes elétricas inteligentes. Redução de demanda na ponta.

ABSTRACT

Demand-side management (DSM) actions are object of study since the mid-1980s. With the advent of smart grids, we expect a breakthrough in the application of DSM actions, since the "intelligence" of grid allows a wide range of information to be directed to the final energy consumer, enabling effective management of electricity consumption. Within this context of managing electricity consumption, there is the Energy Efficiency Program (EEP), in which the electricity utilities are obliged to apply part of their financial resources in GLD. The EEP is characterized as an important source of funds for increasing the energy efficiency of the electrical system, so that the present study aims to define and analyze a methodology for the implementation of smart grid technologies in residential consumers, aiming the execution of energy efficiency actions. For that it was studied the regulatory framework and technologies with potential application involving the energy efficiency theme in smart grids. Also a literature review was conducted to analyze publications with great importance in order to define the state of the art. Starting from the standard calculation of cost- benefit ratio methodology (CBR) set to EEP, a methodology to insert the technologies related to smart grids, consisting of smart outlets and distributed generation was developed. With the methodology for calculation of CRB, several simulations were performed to verify the feasibility of these actions on four different types of consumer: one representing the average consumer of an energy utility (based on a survey of uses and equipment possessions), a profile with low, medium and high electrical energy consumption. With these parameters some simulations were performed and was designed a feasibility stage for applying these technologies to residential customers. Varying the costs of these actions, it is possible to note a better viability when the costs of smart plug and distributed generation are lower, as far as these technologies are becoming common, so it is possible to reach lower prices at market. Even with these costs reduction it is not possible to reach a good CBR, and it was necessary to add another sources of financial investment. The EPP is the major source of investment to energy efficiency, but the resources of this Program are not enough to achieve a good CBR, so it is necessary a customer's investment. Finally, it is shown that the viability of these actions is better when these technologies were applied in customer with a higher elasticity, because the payback is lower.

Keywords: Energy efficiency. Energy saving. Demand-side management. Smart grid. Peak shaving.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - OBJETIVO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NO MUNDO ...	30
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DA REGULAÇÃO DO PEE	37
FIGURA 3 - MODELO CONCEITUAL DE REDE ELÉTRICA INTELIGENTE	40
FIGURA 4 - TÉCNICAS DE GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA	42
FIGURA 5 - ESTRATÉGIA DE COLETA E ANÁLISE DE ARTIGOS CIENTÍFICOS.	47
FIGURA 6 - SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE RESIDENCIAL	67
FIGURA 7 - PASSO A PASSO DA SIMULAÇÃO.....	75
FIGURA 8 - DEFINIÇÃO DA UNIDADE CONSUMIDORA PARA SIMULAÇÃO	95
FIGURA 9 - SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DO USO FINAL ILUMINAÇÃO.....	96
FIGURA 10 - SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DE TOMADAS INTELIGENTES.....	97
FIGURA 11 - SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	98
FIGURA 12 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS PARA O USO FINAL ILUMINAÇÃO	99
FIGURA 13 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS DE TOMADAS INTELIGENTES.....	100
FIGURA 14 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	101
FIGURA 15 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS SEPARADOS POR RUBRICA.....	101
FIGURA 16 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS SEPARADOS POR USO FINAL	102
FIGURA 17 - RCB DE PERFIL DE PESQUISA DE USOS E POSSES	102
FIGURA 18 - RCB DE PERFIL DE BAIXA ELASTICIDADE	103
FIGURA 19 - RCB DE PERFIL DE MÉDIA ELASTICIDADE.....	104
FIGURA 20 - RCB DE PERFIL DE ALTA ELASTICIDADE	105

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DEMANDA RESIDENCIAL	57
GRÁFICO 2 - POSSE DE EQUIPAMENTOS DE CONSUMIDORES DA COPEL	63
GRÁFICO 3 - ESTRUTURA DA TARIFA BRANCA EM DIAS ÚTEIS	65
GRÁFICO 4 - NÚMERO DE CONEXÕES DE MICRO E MINI GD NO BRASIL.....	73
GRÁFICO 5 - POTÊNCIA INSTALADA DE MICRO E MINI GD NO BRASIL.....	74
GRÁFICO 6 - ENERGIA ECONOMIZADA EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO.....	77
GRÁFICO 7 - REDUÇÃO DE DEMANDA EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO.....	78
GRÁFICO 8 - ENERGIA ECONOMIZADA POR TOMADAS INTELIGENTES	81
GRÁFICO 9 - REDUÇÃO DE DEMANDA POR TOMADAS INTELIGENTES	83
GRÁFICO 10 - CONCEITO DE ENERGIA ECONOMIZADA	84
GRÁFICO 11 - CONCEITO DE REDUÇÃO DE DEMANDA NA PONTA	85
GRÁFICO 12 - PERFIL MÉDIO DO CONSUMO RESIDENCIAL NA COPEL.....	89
GRÁFICO 13 - PERFIL DE UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO	90
GRÁFICO 14 - USO DE ELETRODOMÉSTICOS CONTROLÁVEIS.....	91
GRÁFICO 15 - USO DE ELETRODOMÉSTICOS NÃO CONTROLÁVEIS	92
GRÁFICO 16 - PERFIL DIÁRIO DE GERAÇÃO SOLAR	94
GRÁFICO 17 - PERFIL ANUAL DE GERAÇÃO SOLAR	94
GRÁFICO 18 - VARIAÇÃO DO NÚMERO DE RESIDÊNCIAS	106
GRÁFICO 19 - VARIAÇÃO DO CUSTO DAS TOMADAS INTELIGENTES.....	107
GRÁFICO 20 - VARIAÇÃO DO CUSTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	107
GRÁFICO 21 - VARIAÇÃO DO CUSTO DAS TOMADAS INTELIGENTES E GD ..	108
GRÁFICO 22 - VARIAÇÃO DA ORIGEM DOS RECURSOS FINANCEIROS.....	109
GRÁFICO 23 - RETORNO DO INVESTIMENTO PARA O CONSUMIDOR.....	110
GRÁFICO 24 - RETORNO DO INVESTIMENTO PERFIL ALTA ELASTICIDADE..	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS PARA ILUMINAÇÃO.....	33
TABELA 2 - PALAVRAS-CHAVE PARA PESQUISA DE PERIÓDICOS.....	47
TABELA 3 - ARTIGOS PESQUISADOS ATRAVÉS DO PORTAL CAPES.....	48
TABELA 4 - FATOR DE IMPACTO DOS PERIÓDICOS SELECIONADOS.....	49
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO QUALIS DOS PERIÓDICOS SELECIONADOS	49
TABELA 6 - BASES DE DADOS SELECIONADAS.....	50
TABELA 7 - ARTIGOS PARA PRÉ-ANÁLISE	50
TABELA 8 - RESUMO DAS ANÁLISES DOS ARTIGOS	51
TABELA 9 - SISTEMA PILOTO DE GERENCIAMENTO DE DEMANDA	59
TABELA 10 - RESULTADOS DAS AÇÕES DE RESPOSTA A DEMANDA.....	60
TABELA 11 - PESQUISA DE MERCADO DE LÂMPADAS LED.....	71
TABELA 12 - PESQUISA DE MERCADO DE TOMADAS INTELIGENTES	72
TABELA 13 - PESQUISA DE MERCADO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	75
TABELA 14 - ESTIMATIVA DE RESIDÊNCIA DE BAIXA ELASTICIDADE	103
TABELA 15 - ESTIMATIVA DE RESIDÊNCIA DE MÉDIA ELASTICIDADE	104
TABELA 16 - ESTIMATIVA DE RESIDÊNCIA DE ALTA ELASTICIDADE.....	105
TABELA 17 - ANÁLISE DE CUSTOS POR CONSUMIDOR FINAL.....	110

LISTA DE SIGLAS

AEE	Ações de eficiência energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CV	Coeficiente de variação
CED	Custo unitário evitado de demanda
CEE	Custo unitário da energia economizada
CIR	Controlador inteligente residencial
Copel	Companhia Paranaense de Energia
EE	Energia economizada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração distribuída
GLD	Gerenciamento pelo lado da demanda
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LED	Diodo emissor de luz (do inglês, <i>light-emitting diode</i>)
M&V	Medição e verificação
MEC	Ministério da Educação
MME	Ministério das Minas e Energia
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
P&D	Programa de Pesquisa e Desenvolvimento
PEE	Programa de Eficiência Energética
PNE	Plano Nacional de Energia
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
Propee	Procedimentos do Programa de Eficiência Energética
RCB	Relação custo-benefício
RDP	Redução de demanda em horário de ponta
REI	Redes elétricas inteligentes
ROL	Renda operacional líquida
TE	Tarifa de energia
TUSD	Tarifa de uso do sistema de distribuição

LISTA DE SÍMBOLOS

BA_{CG}	Benefício anual da central geradora
BA_T	Benefício anual do projeto
CA_n	Custo anualizado de um determinado material n
CA_T	Custo anualizado do projeto
CE_n	Custo direto de um equipamento n
CE_T	Custo de todos os equipamentos do projeto
CT	Custo total do projeto
Da_i	Demanda elétrica do sistema i antes da AEE
DA_P	Demanda atendida em horário de ponta
dp_i	Demanda média em horário de ponta do equipamento i
Dp_i	Demanda elétrica do sistema i após a AEE
dpe_i	Demanda média na ponta de um equipamento i em modo de espera
Ea_i	Consumo de energia no sistema i antes da AEE
EG_P	Energia gerada pela central geradora em horário de ponta
EG_{FP}	Energia gerada pela central geradora em horário fora de ponta
Ep_i	Consumo de energia no sistema i após a AEE
$FCPa_i$	Fator de coincidência na ponta antes da AEE
$FCPae_i$	Fator de coincidência na ponta em modo de espera antes da AEE
$FCPp_i$	Fator de coincidência na ponta após a AEE
$FCPpe_i$	Fator de coincidência na ponta em modo de espera após a AEE
FRC_u	Fator de recuperação de capital para um material com vida útil u
ha_i	Horário de funcionamento de um equipamento i antes da AEE
hp_i	Horário de funcionamento de um equipamento i após a AEE
hpe_i	Horário de funcionamento em modo de espera após a AEE
m	Número total de sistemas a serem submetidos à AEE
nd_i	Número de dias úteis em que o equipamento é utilizado por mês
nm_i	Número de meses por ano em que o equipamento é utilizado
nup_i	Horas de utilização em horário de ponta do equipamento por dia
$nupf_i$	Permanência do equipamento conectado à rede elétrica na ponta
pa_i	Potência de cada equipamento antes da AEE
pae_i	Potência de um equipamento em modo de espera antes da AEE
pp_i	Potência de um equipamento após a AEE
ppe_i	Potência de um equipamento em modo de espera após a AEE

q_{a_i}	Quantidade de cada equipamento antes da AEE
q_{p_i}	Quantidade de cada equipamento após a AEE
t	Taxa de desconto
u	Vida útil de um determinado material
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVOS	28
1.2	JUSTIFICATIVA	29
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	33
2.1.1	Tecnologias	34
2.1.2	Regulação no Brasil	36
2.1.3	Programa de Eficiência Energética	36
2.1.4	Projetos de eficiência energética - relação custo-benefício.....	39
2.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	40
2.2.1	Redes elétricas inteligentes.....	40
2.2.2	Gerenciamento pelo lado da demanda.....	41
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	43
3	REVISÃO DA LITERATURA	46
3.1	ESTRATÉGIA DE COLETA DE MATERIAIS	46
3.2	ANÁLISE DA LITERATURA	47
3.2.1	Eficiência energética e redes elétricas inteligentes	51
3.2.2	Eficiência energética e gerenciamento pelo lado da demanda.....	54
3.2.3	Eficiência energética e resposta a demanda	56
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	60
4	MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1	MATERIAIS	62
4.1.1	Pesquisa de usos e posses de equipamentos.....	62
4.1.2	Análise regulatória.....	63
4.1.3	Sistemas de iluminação.....	65
4.1.4	Sistema inteligente de medição e controle residencial	66
4.1.4.1	Tomadas inteligentes	67
4.1.4.2	Medidores inteligentes.....	68
4.1.4.3	Geração distribuída	69
4.2	MÉTODOS	70
4.2.1	Utilização da pesquisa de usos e posses de equipamentos	70

4.2.2	Sistemas de iluminação.....	70
4.2.3	Tomadas inteligentes	72
4.2.4	Medidores inteligentes.....	72
4.2.5	Micro e mini geração distribuída.....	73
4.2.6	Simulações	75
4.2.6.1	Definição das ações de eficiência energética.....	76
4.2.6.2	Cálculo dos benefícios anuais	76
4.2.6.3	Cálculo dos custos anualizados	85
4.2.6.4	Cálculo da relação custo-benefício.....	86
4.2.6.5	Análises das simulações	87
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	87
5	TESTES E ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	88
5.1	DEFINIÇÃO DO CENÁRIO PARA SIMULAÇÃO.....	88
5.1.1	Análise da pesquisa de usos e posses de equipamentos	89
5.1.2	Escolha da tecnologia para sistemas de iluminação	93
5.1.3	Perfil de geração dos painéis solares.....	93
5.2	SIMULAÇÃO BASEADA NA PESQUISA DE USOS E POSSES	95
5.2.1	Cálculo dos benefícios anuais.....	96
5.2.2	Cálculo dos custos anualizados	99
5.2.3	Cálculo da relação custo-benefício.....	102
5.3	SIMULAÇÃO DE PERFIS DE CONSUMO	102
5.3.1	Perfil de baixa elasticidade	103
5.3.2	Perfil de média elasticidade.....	103
5.3.3	Perfil de alta elasticidade.....	104
5.4	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE NAS SIMULAÇÕES	105
5.4.1	Análise do ponto de vista do consumidor final.....	108
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	111
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	114
6.1	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	117
	REFERÊNCIAS.....	120

1 INTRODUÇÃO

Após diversas crises nacionais e internacionais enfrentadas pelo setor energético, fortaleceu-se cada vez mais o tema da eficiência energética. De acordo com Marques *et al.* (2007), nestes períodos de crise a economia de energia passou a fazer parte de um grande esforço conjunto, tanto das concessionárias quanto dos consumidores.

Segundo Zipperer *et al.* (2013), nos Estados Unidos estima-se que o setor residencial seja responsável por 37% do consumo de energia elétrica. No Brasil, segundo dados disponibilizados no Balanço Energético Nacional, elaborado pela EPE (2013), o consumo de energia elétrica no setor residencial corresponde a 23,6% do total consumido no país. Com estes dados é possível observar a importância da execução de ações de eficiência energética, bem como se pode inferir que ações de redução de consumo realizadas para esta classe podem representar benefício em grande escala para o setor elétrico.

Com o avanço da tecnologia, em especial àquelas aplicadas nas redes elétricas, surgiu o conceito das redes elétricas inteligentes, a qual abre um novo leque de possibilidades, especialmente no campo da eficiência energética. Segundo Momoh (2012), a rede elétrica inteligente, depois de completamente desenvolvida, permitirá o envolvimento de clientes bem como proporcionará melhorias na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, utilizando ferramentas que permitirão a minimização da vulnerabilidade do sistema, aumento do controle e da robustez do sistema.

O benefício das redes elétricas inteligentes pode ser conjunto, uma vez que as concessionárias e os consumidores podem colher benefícios através do gerenciamento pelo lado da demanda. Segundo Gellings (1985) o conceito de gerenciamento pelo lado da demanda traduz-se como o planejamento e execução de atividades para influenciar o uso de eletricidade do consumidor de maneira a produzir mudanças desejadas na curva de carga de um sistema elétrico. Por consequência, considera-se o gerenciamento pelo lado da demanda como um agrupamento de conceitos que recaem em uma mesma categoria, agregando diferentes ações para o gerenciamento de carga, incluindo tarifas variáveis, uso racional de energia, substituição de combustíveis, aplicações energéticas emergentes, eficiência energética e resposta à demanda.

Através das redes elétricas inteligentes e da realização das ações de gerenciamento pelo lado da demanda, espera-se ser possível incentivar o deslocamento das cargas e, por consequência, aperfeiçoar a estrutura existente do sistema elétrico, ao mesmo tempo em que os consumidores podem se beneficiar de uma conta de energia elétrica mais econômica.

Atualmente existem diversas pesquisas relacionadas às tecnologias de redes elétricas inteligentes. Nota-se, entretanto, uma carência de estudos sobre a viabilidade técnico-econômica de aplicação desta tecnologia. Pretende-se com este trabalho não só estudar a viabilidade de ações de eficiência energética aplicáveis em redes elétricas inteligentes, mas também a proposição de ações para que esta tecnologia seja difundida em longo prazo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a viabilidade técnico-econômica de ações de eficiência energética em consumidores residenciais em um cenário de redes elétricas inteligentes.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- levantar as possibilidades de ações a serem realizadas através do Programa de Eficiência Energética (PEE), executado pelas distribuidoras e permissionárias de energia elétrica em atendimento à regulamentação emanada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL);
- levantar as tecnologias relacionadas às redes elétricas inteligentes com potencial de inserção nos consumidores residenciais;
- levantar o arcabouço regulatório do setor elétrico brasileiro para as redes elétricas inteligentes;
- definir, com base em critérios técnicos, as tecnologias que serão aplicadas em ações de eficiência energética;
- desenvolver e analisar metodologia para inserção destas tecnologias de gerenciamento pelo lado da demanda em consumidores residenciais;
- propor ações para que a tecnologia de redes elétricas inteligentes possa ser viabilizada e difundida em longo prazo.

1.2 JUSTIFICATIVA

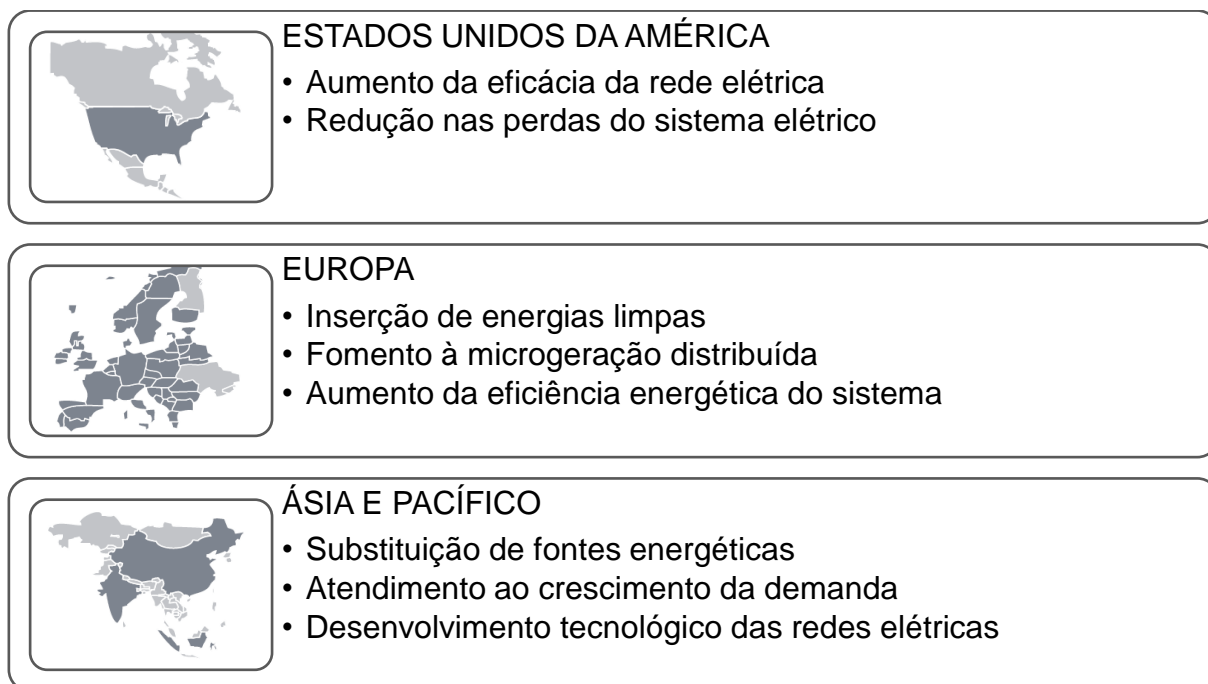
Segundo a ANEEL (2013a), o objetivo do Programa de Eficiência Energética é promover o uso eficiente e racional de energia elétrica em todos os setores da economia por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. Para isso, busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada no âmbito desses programas. Busca-se, enfim, a transformação do mercado de energia elétrica, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica.

Existe uma carência de ações de eficiência energética em larga escala voltado para consumidores residenciais, mesmo estes correspondendo a 23,6% do total de energia elétrica consumido no Brasil (EPE, 2013). Por outro lado, no mercado estão surgindo novas tecnologias voltadas para o gerenciamento do consumo de energia elétrica de aplicações domésticas, muitas delas se beneficiando de conceitos de redes elétricas inteligentes.

Dentro das novas tecnologias que estão surgindo, destacam-se as redes elétricas inteligentes. Segundo CGEE (2012), “as redes elétricas inteligentes (REI) podem ser compreendidas como a rede elétrica que utiliza tecnologia digital avançada para monitorar e gerenciar o transporte de energia elétrica em tempo real, com fluxo de energia e de informações bidirecionais entre o sistema de fornecimento de energia e o cliente final. A implementação da REI possibilita uma gama de novos serviços, abrindo a possibilidade de novos mercados. Desta forma, a REI se apresenta como uma das fortes tendências de modernização do sistema elétrico em vários países”.

As redes elétricas inteligentes já são realidade em diversos países (CGEE, 2012). Em países europeus e nos Estados Unidos da América já são observadas iniciativas implantadas de projetos de infraestrutura de medição inteligente avançada e de geração distribuída, que são os passos iniciais para uma futura rede de energia elétrica inteligente. Países como China e Coréia do Sul têm se destacado em investimentos de médio e longo prazos para a criação desse tipo de rede elétrica. Apesar das motivações serem aparentemente diversas, em essência elas convergem para um único ponto, que é a melhoria das redes elétricas (FIGURA 1).

FIGURA 1 - OBJETIVO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NO MUNDO



FONTE: Adaptado de CGEE (2012)

Ainda segundo CGEE (2012) os primeiros projetos pilotos no Brasil estão em suas etapas iniciais. Esses projetos de pesquisa e de desenvolvimento serão importantes para futuras decisões em relação à legislação do setor elétrico, que deverão ser tomadas pelos órgãos governamentais responsáveis.

Dentro deste contexto se insere este trabalho, cujo objetivo principal é proporcionar uma ligação entre o escopo de ações do Programa de Eficiência Energética com o atual cenário de pesquisa no setor energético brasileiro.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. O presente capítulo apresenta a introdução do trabalho, contextualizando-o e estabelecendo os objetivos do mesmo, os quais são suportados pela justificativa para execução da pesquisa.

O capítulo dois apresenta os conceitos teóricos que serão utilizados no trabalho, com foco nos aspectos regulatórios pertinentes ao tema de eficiência energética e redes elétricas inteligentes, bem como o escopo de ações abrangidas pelo Programa de Eficiência Energética.

O capítulo três apresenta a revisão da literatura, demonstrando a forma de levantamento do estado da arte pertinente. Foram apresentados os resultados da coleta de artigos científicos, bem como um resumo dos artigos mais relevantes identificados.

No capítulo quatro serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho, com ênfase nas ferramentas para definição de um cenário para simulações, os aspectos regulatórios envolvidos e as tecnologias a serem empregadas. Os métodos também são definidos neste mesmo capítulo, consistindo principalmente de como os materiais coletados serão empregados e na metodologia para simulações a serem realizadas no final deste trabalho.

No capítulo cinco são apresentados os resultados das simulações desenvolvidas, bem como análises sobre os resultados das mesmas.

No capítulo seis será apresentada a conclusão e a sugestão de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os aspectos teóricos envolvendo eficiência energética e redes elétricas inteligentes.

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética visa reduzir a quantidade de energia necessária para se produzir um determinado efeito útil, sem reduzi-lo. Este conceito geralmente é associado com a substituição de equipamentos obsoletos por outros mais modernos, uma vez que se busca produzir um mesmo efeito útil utilizando um volume menor de insumos ou, em outras palavras, trata-se de fazer mais por menos. O exemplo clássico é o dos sistemas de iluminação, no qual é comparado o efeito útil que se deseja produzir, o fluxo luminoso, através da utilização da energia elétrica.

Através de uma comparação objetiva, é possível observar a essência da eficiência energética. Tomando a lâmpada incandescente como referência, nota-se a economia que se obtém ao utilizar uma tecnologia mais eficiente para produzir o mesmo efeito útil desejado. Utilizando três lâmpadas distintas para produzir um fluxo luminoso de aproximadamente 800 lm, considerando um mesmo perfil de utilização (três horas por dia durante um mês), é possível observar uma expressiva economia de energia elétrica (TABELA 1).

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS PARA ILUMINAÇÃO

TIPOS DE LÂMPADA	EFICIÊNCIA	POTÊNCIA	CONSUMO	ECONOMIA
Lâmpada incandescente	10 lm/W	60 W	1,80 kWh/mês	-
Lâmpada fluorescente compacta	65 lm/W	15 W	0,45 kWh/mês	75%
Lâmpada LED	≥ 80 lm/W	9 W	0,27 kWh/mês	≥ 85%

FONTE: O autor (2016)

Também existe o conceito de conservação de energia, o qual por vezes é confundido com eficiência energética, uma vez que ambos objetivam a redução do consumo de energia elétrica e da potência necessária para suprir uma determinada carga. Brown (2014) explica que, diferentemente da eficiência energética, no caso da conservação de energia, pode existir uma redução de conforto pessoal, satisfação do consumidor ou de algum outro fator. As ações de conservação de energia, por outro

lado, podem ou não incorrer em uma redução do conforto do usuário final. Diferentemente do exemplo da substituição das lâmpadas, no qual o efeito útil desejado é mantido, a ação de conservação de energia seria a redução no tempo que a lâmpada permanece acesa.

A partir dos conceitos de eficiência energética e conservação de energia, define-se o conceito de ação de eficiência energética (AEE). Estas ações compreendem atividades ou conjunto de atividades concebidas para aumentar a eficiência energética de uma instalação, sistema ou equipamento, podendo também conservar a energia sem mudar a eficiência geral do sistema (EVO, 2012).

Uma ação de eficiência energética pode implicar uma ou mais alterações físicas aos equipamentos da instalação, revisões dos procedimentos de funcionamento e de manutenção, alterações de *software* ou novos meios de formação ou gestão dos usuários do ambiente ou operações e do pessoal da manutenção, podendo ser aplicada como uma alteração a um sistema ou instalação já existente ou como uma modificação a um projeto antes da construção de um novo sistema ou instalação.

Existe também o conceito de racionamento de energia elétrica, o qual é caracterizado pela redução mandatória do consumo de energia elétrica, obtido através da limitação na distribuição da energia elétrica. Tal medida é empregada somente em casos extremos, quando a situação do fornecimento de energia elétrica está em um ponto crítico. Por se tratar de uma medida extrema, o racionamento de energia não fará parte do foco de ações a serem estudadas no decorrer deste trabalho.

2.1.1 Tecnologias

Segundo Marques *et al.* (2007), dentre os vários custos gerenciáveis em uma empresa, seja do setor industrial ou comercial, a energia elétrica vem assumindo, cada vez mais, uma importância crescente, motivada pela redução de custos decorrentes do mercado competitivo, pelas incertezas da disponibilidade energética ou por restrições ambientais. Seja qual for a motivação, promover a eficiência energética é essencialmente aplicar os conhecimentos de engenharia, da economia e da administração aos sistemas energéticos.

A gama de ações de eficiência energética executadas é bastante extensa, sendo possíveis de serem aplicadas em todos os setores da economia. Por serem

mais usuais, algumas ações de eficiência energética são retratadas de forma mais frequente na literatura, conforme:

- gerenciamento energético: conhecendo as informações relacionadas com fluxo de energia, acompanhando as ações que influenciam estes fluxos, processos e atividades que utilizam a energia e a relacionam com um produto ou serviço. Também realizando acompanhamento de índices de controle, tais como custos específicos e fatores de utilização, e atuando nestes indicadores visando reduzir o consumo energético;
- iluminação: estando presente em praticamente todos os setores da economia, estas ações consistem na substituição de equipamentos por outros mais eficientes, instalação de dispositivos de controle e de um melhor aproveitamento da iluminação natural. No Brasil os sistemas de iluminação são responsáveis por, aproximadamente, 23% do consumo de energia elétrica do setor residencial, 44% no setor de comércio e serviços e 1% no setor industrial (MARQUES *et al.*, 2007);
- condicionamento ambiental: substituindo equipamentos de climatização de menor porte (ares-condicionados de janela ou *splits*) e de maior porte (*self containeds* e *chillers*) por equipamentos mais eficientes, bem como sistemas de controle mais modernos. Além do investimento na melhoria da energia elétrica em energia térmica, é possível aprimorar o uso da energia térmica diretamente, tais como redução nas perdas nos isolamentos térmicos;
- sistemas motrizes: tratando-se de equipamentos para conversão de energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa (neste caso vindo a ser chamado de gerador), dentre as ações possíveis estão a substituição de equipamentos por outros de maior rendimento, bem como a implementação de inversores de frequência e a melhoria dos sistemas mecânicos de acoplamento;
- sistemas de refrigeração: compreendem principalmente ações de substituição de sistemas de pequeno porte (geladeiras, *freezers*) e sistemas de grande porte (câmaras frigoríficas);
- sistemas de aquecimento de água: atualmente grande parte dos sistemas de aquecimento de água, especialmente no setor residencial, é composta

por aquecedores elétricos de água (aquecedores de passagem e chuveiros elétricos). Estes equipamentos normalmente possuem uma elevada potência elétrica de entrada e, devido à sua grande penetração no mercado brasileiro, foram e continuam sendo um dos principais responsáveis pelo pico de demanda do sistema elétrico, denominado horário de ponta.

2.1.2 Regulação no Brasil

A Lei Federal nº 9.991, de 24 de julho de 2000, instituiu a obrigatoriedade da aplicação de 1% da receita operacional líquida da distribuidora em projetos de pesquisa e desenvolvimento, através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), bem como em ações de eficiência energética, através do Programa de Eficiência Energética (PEE). O PEE caracteriza-se como uma importante fonte de recursos para ações de eficiência energética em âmbito nacional.

Um importante marco legal na eficiência energética no Brasil foi a publicação da Lei Federal 10.295, de 17 de outubro de 2001, a qual instituiu níveis mínimos e revisáveis de eficiência a serem atendidos por equipamentos que consomem energia elétrica. Esta lei beneficia todas as classes de consumidores de forma abrangente, uma vez que grande parte dos equipamentos abrangidos por esta lei é de aplicação comum, podendo ser citados como exemplo as lâmpadas, ares-condicionados, entre outros.

Outros passos foram dados para a regulação de sistemas de tarifação diferenciada para consumidores de pequeno porte, a exemplo do que ocorre com consumidores atendidos em alta tensão. Através da Resolução Normativa 479, de 3 de abril de 2012, foi instituída a tarifa branca, a qual possibilita tarifar consumidores atendidos em baixa tensão com valores diferenciados em horário de ponta, horário intermediário e em horário fora de ponta.

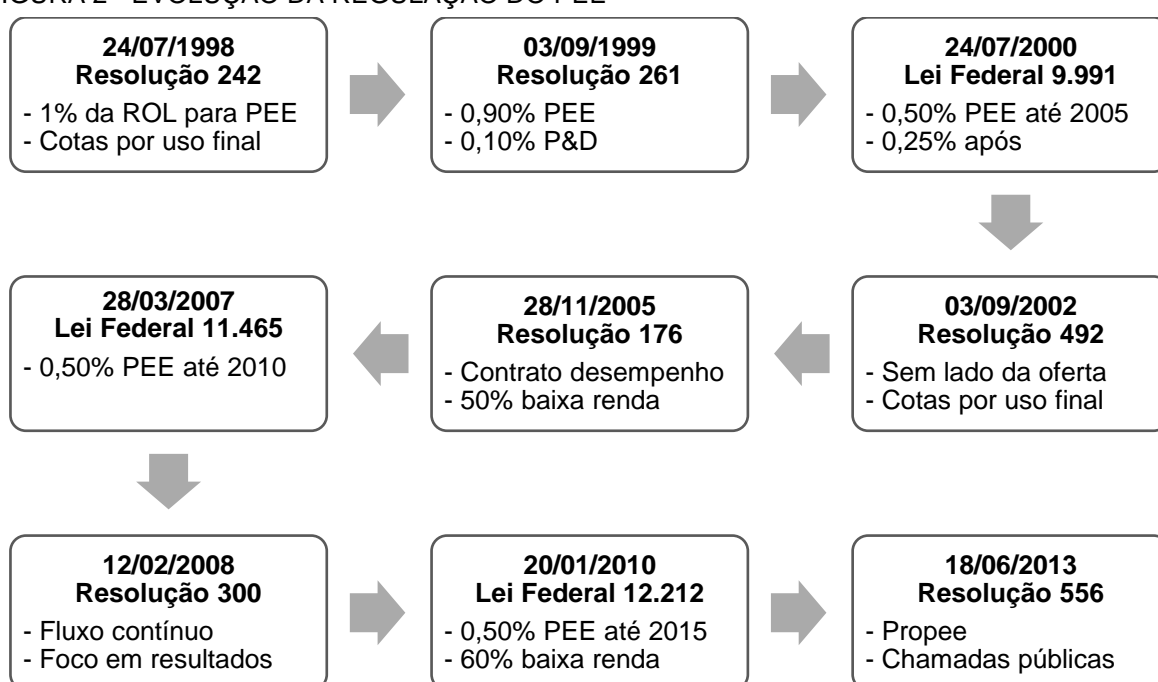
2.1.3 Programa de Eficiência Energética

Atualmente as distribuidoras e permissionárias de energia elétrica são obrigadas por lei a realizar investimento em ações de eficiência energética e conservação de energia, no montante de um percentual de suas rendas operacionais

líquidas (ROL). Tal obrigatoriedade é instituída através de leis federais e resoluções normativas, publicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica.

Embora a Lei Federal 9.991, de 24 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), seja considerada o marco inicial do Programa de Eficiência Energética executado atualmente pelas distribuidoras de energia elétrica, este início data na verdade de período anterior, através de resoluções publicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (FIGURA 2).

FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DA REGULAÇÃO DO PEE



FONTE: Adaptado de ANEEL (2013a)

Atualmente as regras do Programa de Eficiência Energética foram definidas através da Resolução Normativa 566, de 18 de junho de 2013 (ANEEL, 2013b). Através desta resolução foi aprovado o documento intitulado Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (Propee), que consiste em um guia determinativo de procedimentos que devem ser seguidos por todas as distribuidoras de energia elétrica para execução do Programa de Eficiência Energética.

O objetivo do PEE é promover o uso eficiente e racional de energia elétrica em todos os setores da economia por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. Para isso,

busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada no âmbito desses programas. Busca-se, enfim, a transformação do mercado de energia elétrica, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica (ANEEL, 2013a).

Existe um grande alinhamento do Programa de Eficiência Energética com ações governamentais. O Ministério de Minas e Energia (MME), com suporte da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), elabora planejamentos de longo e médio prazo para o setor de energia, entre eles o Plano Nacional de Energia (PNE), o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) e o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf). Estes planos definem metas de eficiência energética e consideram o PEE como a principal fonte de recursos, o que confirma a necessidade de alinhamento das ações do PEE com as metas e diretrizes governamentais (ANEEL, 2013a).

Fazem parte do escopo de atividades do PEE:

- troca de equipamentos existentes por outros mais eficientes;
- atividades de treinamento e capacitação, ligadas à implementação de ações de eficiência energética, que estimulem o uso mais eficiente da energia;
- projetos educacionais visando difundir o conceito de eficiência energética e desenvolvimento sustentável na rede formal de ensino, promovendo a mudança de hábitos de consumo de energia;
- apoio à implantação de projetos de gestão energética;
- projetos especiais, com ações demonstrativas em projetos:
 - prioritários: como instrumento de políticas públicas de energia;
 - pilotos: buscando pioneirismo tecnológico e casos de sucesso;
 - grande relevância: para o atendimento de casos especiais e objetivos além do energético;
 - cooperativos: congregando várias distribuidoras, visando obter economia de escala e atuação regional;
- avaliação constante e sistemática dos resultados obtidos, com redefinição das ações dentro do contexto de uma política nacional de eficiência energética;
- divulgação do PEE, visando a mudança dos hábitos de consumo de energia elétrica e a transparência da aplicação dos recursos do Programa.

2.1.4 Projetos de eficiência energética - relação custo-benefício

O principal critério para avaliação da viabilidade econômica de um projeto do PEE é a relação custo benefício (RCB) que ele proporciona (ANEEL, 2013a). O benefício considerado é a valoração da energia economizada e da redução da demanda na ponta durante a vida útil do projeto para o sistema elétrico. O custo são os aportes feitos para a sua realização (do PEE, do consumidor ou de terceiros).

Sobre os custos do projeto, são realizadas as seguintes análises:

- ponto de vista do PEE: os benefícios são comparados somente aos custos aportados pelo PEE;
- ponto de vista do projeto: os benefícios são comparados a todos os recursos aportados por todos os agentes envolvidos (PEE, consumidor e terceiros).

Os benefícios, por sua vez, podem ser analisados sobre duas óticas:

- ótica do sistema elétrico (sociedade): valorando as economias de energia e redução de demanda pelo custo marginal de ampliação do sistema, tarifa azul, ou tarifa do sistema de bandeiras tarifárias de energia;
- ótica do consumidor: valorando estas grandezas pelo preço pago pelo consumidor, ou seja, pela tarifa de energia elétrica.

Conforme critérios definidos pela ANEEL (2013a), para avaliar a viabilidade econômica do projeto realizado no âmbito do PEE, deve ser considerada a viabilidade de custos aportados pelo Programa de Eficiência Energética (ponto de vista do PEE), sob a ótica do sistema elétrico (sociedade).

A racionalidade da avaliação de um projeto de eficiência energética feito com recurso advindo do Programa de Eficiência Energética de energia elétrica consiste em saber se o benefício auferido é maior que aquele que haveria se o recurso tivesse sido empregado na expansão do sistema elétrico. Assim, considera-se que o benefício apurado com a valoração da energia e da demanda reduzidas ao custo unitário marginal de expansão do sistema deve ser no mínimo 25% maior que o custo do projeto. Em outras palavras, a relação custo-benefício do projeto deve ser igual ou inferior a 0,8 (ANEEL, 2013a).

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

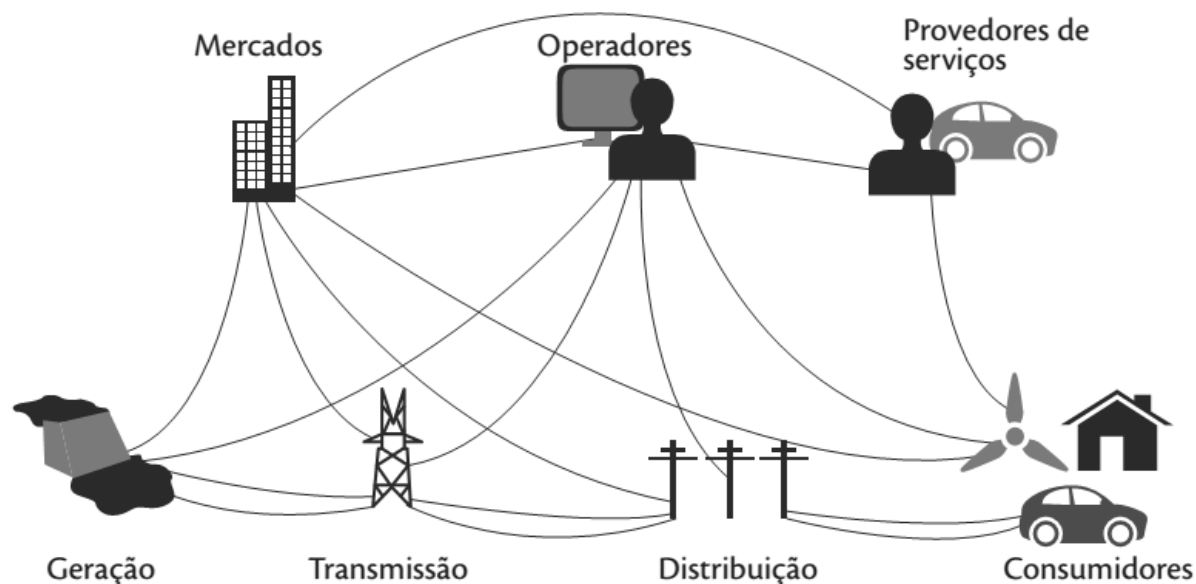
Nesta seção serão abordados os conceitos relacionados com redes elétricas inteligentes, com foco em ações de gerenciamento pelo lado da demanda.

2.2.1 Redes elétricas inteligentes

Uma rede elétrica inteligente deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico. Este conceito baseia-se na utilização de tecnologias de automação, computação e comunicações na rede elétrica, as quais permitirão a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso (FALCÃO, 2010).

O *National Institute of Standards and Technology* (NIST, 2009) elaborou um modelo conceitual para redes elétricas inteligentes. Este modelo prevê um sistema com sete domínios, bem como fluxos de informação e energia elétrica bem definidos (FIGURA 3). Cada domínio pode ser dividido em subdomínios, incluindo atores (dispositivos e *softwares*) e aplicações (gerenciamento de energia).

FIGURA 3 - MODELO CONCEITUAL DE REDE ELÉTRICA INTELIGENTE



FONTE: NIST (2009), adaptado por CGEE (2012)

Segundo Amin e Wollenberg (2005) uma rede elétrica inteligente é, de forma simplificada, um conjunto de agentes independentes, capazes de identificar seu

próprio estado, bem como interagir e cooperar com demais agentes dentro da rede elétrica. Este tipo de configuração permitiria uma série de avanços, tais como a reconfiguração automática da rede devido a uma falha no sistema, ou mesmo a eficientização¹ da rede elétrica através da otimização da sua operação e utilização.

As residências, do ponto de vista do sistema elétrico, são tradicionalmente consideradas como demandas que devem ser supridas, não existindo uma interferência do operador do sistema elétrico no perfil de consumo da residência. Conforme a definição de rede elétrica inteligente, para que um consumidor de energia elétrica do setor residencial possa ser considerado um agente, ele deve ser capaz de identificar seu próprio estado, bem como interagir e cooperar com outros agentes. Para que esta situação ocorra, faz-se necessário uma mudança tecnológica que permita que determinadas cargas, que sejam possíveis de serem controladas, o sejam pelo operador do sistema, visando assim uma otimização do sistema elétrico através do gerenciamento da demanda energética.

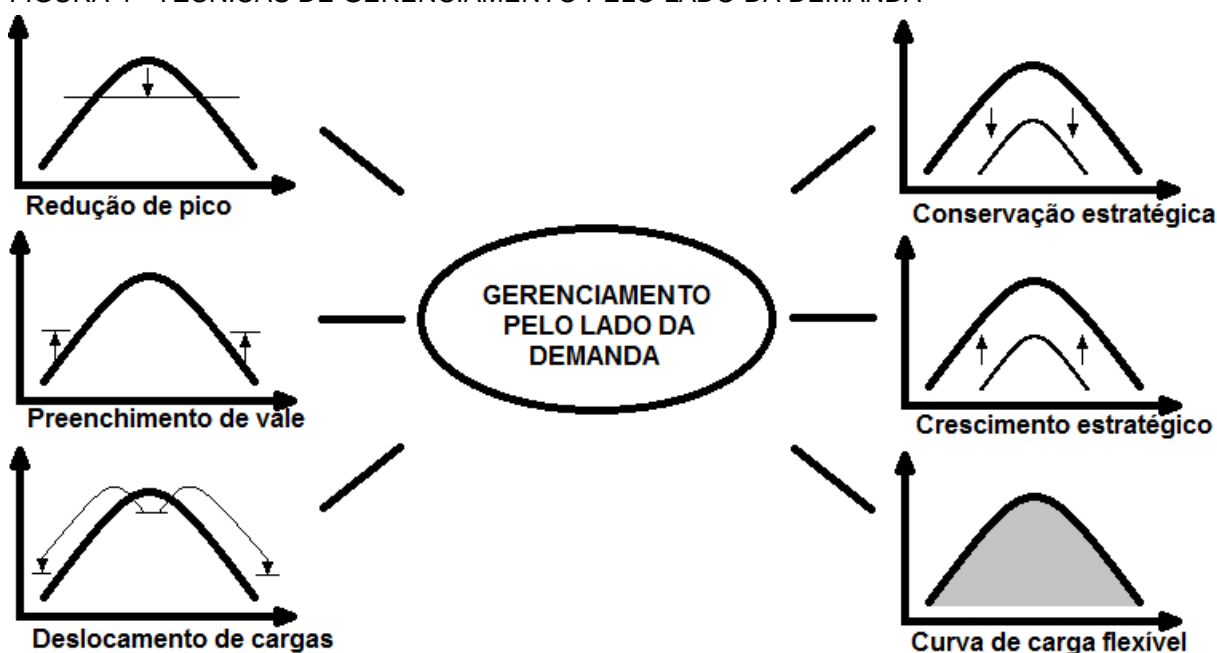
Segundo CGEE (2012), paralelamente ao aprimoramento da inteligência das redes elétricas, houve um crescimento da chamada geração distribuída (GD), sendo esta caracterizada resumidamente como uma geração de energia elétrica de pequeno porte localizada próximo à carga a ser suprida. No setor residencial, a fonte de energia para GD predominante é a fotovoltaica, a qual gera energia elétrica a partir da conversão da energia luminosa emitida pelo sol, possuindo uma característica de ser modular e de fácil instalação.

2.2.2 Gerenciamento pelo lado da demanda

Gellings (1985) definiu gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) como o planejamento, execução e monitoramento de atividades realizadas pelas concessionárias de energia elétrica visando influenciar a utilização da energia pelos usuários finais de modo a produzir efeitos desejados na curva de carga do sistema elétrico. A seguir são apresentadas algumas técnicas de GLD (FIGURA 4).

¹ O verbo “eficientizar” ou “eficientização” refere-se à realização de uma ação de eficiência energética, tratando-se de neologismo, ou seja, um fenômeno linguístico que consiste na criação de uma palavra ou expressão nova, quando um indivíduo, ao se expressar, não encontra a palavra ideal.

FIGURA 4 - TÉCNICAS DE GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA



FONTE: Adaptado de Gellings (1985)

Dentro deste contexto, algumas atividades podem ser executadas:

- redução de pico: trata-se da redução do pico de carga do sistema elétrico, geralmente obtido controlando diretamente as cargas. É a forma mais comum de atuação na GLD;
- preenchimento de vale: é a segunda forma mais comum de atuação, consistindo no incentivo à utilização do sistema em horários que ele é menos utilizado;
- deslocamento de cargas: é a última forma clássica de atuação em GLD, consistindo em deslocar cargas através de sistemas de armazenamento de energia, tais como baterias e reservatórios;
- conservação estratégica: trata-se de um programa de estímulos promovido pela distribuidora visando uma alteração na curva de carga, refletindo em uma redução no consumo ou em uma curva de carga alterada;
- crescimento de carga estratégico: refere-se a um programa de incentivo para crescimento no consumo energético, planejado e executado pelas distribuidoras, podendo incluir a diversificação de fontes energéticas;
- curva de carga flexível: é um conceito relacionado com a estabilidade do sistema elétrico, no qual a curva de carga, antes fixa, agora é possível de ser flexibilizada pelos consumidores mediante algum incentivo.

Desde a definição das ações de gerenciamento pelo lado da demanda, foram buscadas diversas formas de aplicá-las. Devido ao nível de desenvolvimento tecnológico, grande parte destas ações no setor residencial consistia basicamente na substituição de equipamentos, visando reduzir a potência elétrica para realizar uma determinada tarefa.

Com o advento das redes elétricas inteligentes, foram desenvolvidas novas tecnologias e, dentre elas, destacam-se as tomadas inteligentes. Estes dispositivos são dotados de micromedidores, atuadores e canais de comunicação, permitindo assim o monitoramento, corte e agendamento do acionamento de uma carga. Através das tomadas inteligentes vislumbra-se uma nova forma de ação de gerenciamento pelo lado demanda, permitindo que o próprio sistema elétrico crie condições para que determinados equipamentos sejam utilizados somente em horários que o sistema estiver subutilizado, ou seja, fora do horário de ponta.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Ações de eficiência energética são recorrentes em consumidores industriais e empreendimentos comerciais, uma vez que estes consumidores utilizam a energia elétrica de forma intensiva e a redução destes custos implica em uma maior competitividade, fazendo com que os próprios gestores destas unidades necessitem efficientizar seus processos.

O setor residencial, por sua vez, carece de investimentos em eficiência energética. Como ações de conservação de energia normalmente implicam em uma redução no conforto pessoal (BROWN, 2014) e o custo da energia elétrica esteve historicamente em um baixo patamar, sendo reduzido ainda mais através de medidas regulatórias (BRASIL, 2012), não existia um real incentivo para a eficiência energética em residências. Esta situação se inverteu com uma sucessão de aumentos nas tarifas de energia elétrica, os quais ocorreram devido à desestabilização criada no setor elétrico através das manobras regulatórias, representando um reajuste médio superior a 50% em 2015 para consumidores da Copel.

Em se tratando de eficiência energética, no setor residencial são mais recorrentes as ações nos sistemas de iluminação, condicionamento ambiental, refrigeração e sistemas de aquecimento de água, os quais consistem basicamente em

substituição pura e simples de equipamentos. Nestes casos, é promovida somente uma redução na potência elétrica dos equipamentos, sem levar em consideração os períodos de funcionamento dos mesmos. Através do advento das redes elétricas inteligentes, vislumbra-se a possibilidade deste controle do período de funcionamento.

Televisores, computadores e diversos equipamentos eletrônicos presentes nas residências consomem energia elétrica mesmo quando aparentemente desligados, uma vez que na verdade estes equipamentos estão em um modo de baixo consumo ou modo de espera. Através de controladores dotados de inteligência, espera-se poder reduzir este consumo, uma vez que esta energia consumida em modo de espera está sendo simplesmente desperdiçada, sem a produção de nenhum efeito útil a partir dela.

De forma semelhante, existe uma carência de ações de gerenciamento energético, as quais se espera que ganhem força com o advento das redes elétricas inteligentes. Busca-se neste trabalho um fomento para estas ações, através da realização de projetos no âmbito do Programa de Eficiência Energética executado pelas distribuidoras de energia elétrica e regulado pela Aneel.

3 REVISÃO DA LITERATURA

As redes elétricas inteligentes são a evolução das redes elétricas convencionais. Existe uma famosa comparação em que, se por um lado Alexander Graham Bell não reconheceria o atual sistema telefônico, Thomas Alva Edison estaria muito familiarizado com o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica existente nos dias de hoje.

Esta evolução vem sendo amplamente discutida e estudada, existindo um interesse crescente pelo tema. Sendo assim, faz-se necessário um aprofundado estudo sobre as publicações mais pertinentes e atuais sobre o tema, uma vez que se trata de um tema bastante abrangente, lidando desde os quesitos regulatórios e operacionais até questões como sistemas de comunicação e a segurança das informações que neles trafegarão.

3.1 ESTRATÉGIA DE COLETA DE MATERIAIS

O foco principal desta dissertação é analisar a viabilidade técnico-econômica da inserção da tecnologia de redes elétricas inteligentes em clientes residenciais, do ponto de vista da eficiência energética.

Foi realizada a coleta de artigos científicos através do Portal de Periódicos da Capes, disponibilizado pelo Ministério da Educação (MEC). Procederam-se buscas utilizando palavras-chave vinculadas a eficiência energética ((i) eficiência energética - *energy efficiency*) e redes elétricas inteligentes ((i) redes elétricas inteligentes - *smart grids*, (ii) gerenciamento pelo lado da demanda - *demand side management* e (iii) resposta a demanda - *demand response*).

As palavras-chave utilizadas buscam cercar os principais aspectos a serem estudados, uma vez que através deste estudo busca-se analisar ações de eficiência energética a serem viabilizadas através das redes elétricas inteligentes. Sabe-se também que tanto o gerenciamento pelo lado da demanda quanto ações de resposta a demanda são objeto de estudo de longa data, porém somente com o advento das redes elétricas inteligentes é que estas ações podem se viabilizar.

Visando a maior correlação e pertinência dos períodos procurados ao tema deste trabalho, foram realizadas buscas utilizando combinações com todas as palavras-chave, resultando em três buscas diferentes (TABELA 2).

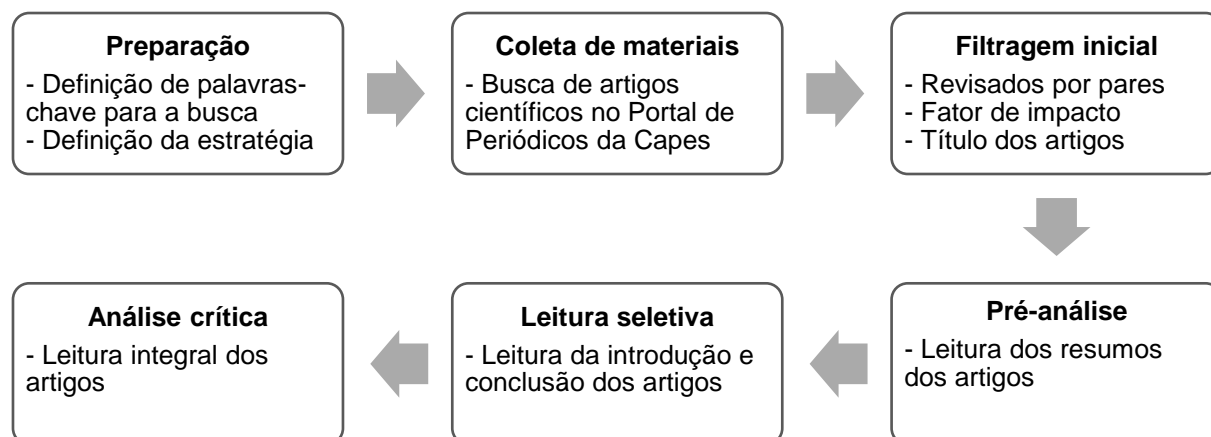
TABELA 2 - PALAVRAS-CHAVE PARA PESQUISA DE PERIÓDICOS

PESQUISA	PALAVRAS-CHAVE
i + i	Eficiência energética + Redes elétricas inteligentes
i + ii	Eficiência energética + Gerenciamento pelo lado da demanda
i + iii	Eficiência energética + Resposta a demanda

FONTE: O autor (2016)

Em virtude do volume de artigos científicos que geralmente são encontrados em uma pesquisa de periódicos, faz-se necessária uma estratégia de coleta e análise destes artigos científicos. Foi elaborado um fluxograma para ilustrar o procedimento que será seguido nesta dissertação (FIGURA 5).

FIGURA 5 - ESTRATÉGIA DE COLETA E ANÁLISE DE ARTIGOS CIENTÍFICOS



FONTE: O autor (2016)

3.2 ANÁLISE DA LITERATURA

Foram buscados os artigos mais recentes dentro das três pesquisas citadas anteriormente (TABELA 2). Optou-se pelos artigos publicados nos dois últimos anos. O primeiro filtro utilizado foi selecionar periódicos revisados por pares. Os resultados obtidos estão expostos na tabela a seguir (TABELA 3).

TABELA 3 - ARTIGOS PESQUISADOS ATRAVÉS DO PORTAL CAPES

BASE DE DADOS	i+i	i+ii	i+iii	TOTAL
Scopus (Elsevier)	101	64	85	250
OneFile (GALE)	72	35	59	166
Technology Research Database	48	44	54	146
SciVerse ScienceDirect (Elsevier)	47	38	52	137
Engineering Research Database	35	41	42	118
Advanced Technologies Database with Aerospace	42	33	41	116
Science Citation Index Expanded (Web of Science)	49	19	44	112
Civil Engineering Abstracts	19	29	28	76
Electronics and Communications Abstracts	31	16	27	74
Environmental Engineering Abstracts	15	25	24	64
SpringerLink	23	9	14	46
Social Sciences Citation Index (Web of Science)	7	8	17	32
Computer and Information Systems Abstracts	17	6	7	30
Materials Research Database	10	9	11	30
Aerospace Database	7	10	10	27
Materials Business File	9	8	8	25
IEEE Journals and Magazines	9			9
ASFA: Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts		3	4	7
MEDLINE/PubMed (NLM)			7	7
Directory of Open Access Journals (DOAJ)	5			5
Wiley Online Library	3			3
Solid State and Superconductivity Abstracts	3			3
Ceramic Abstracts		3		3
J-STAGE (Japan Science and Technology Agency)			3	3
SAGE Journals		2		2
Oxford Journals (Oxford University Press)		2		2
Physical Education Index			1	1
Total por pesquisa	552	404	538	1.494

FONTE: O autor (2016)

A primeira pesquisa resultou em um total de 1.494 artigos (TABELA 3). Buscaram-se então os periódicos mais relevantes dentro de cada base de dados, baseado no fator de impacto (TABELA 4).

TABELA 4 - FATOR DE IMPACTO DOS PERIÓDICOS SELECIONADOS

BASE DE DADOS	PERIÓDICOS	FATOR DE IMPACTO
Scopus (Elsevier)	Energy Conversion and Management	4,380
SciVerse ScienceDirect (Elsevier)	Futures	1,012
SpringerLink	Energy Efficiency	1,060
SpringerLink	Annual Review of Environment and Resources	5,892
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Power Systems	2,814
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Power Electronics	6,008
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Power Delivery	1,733
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Industrial Electronics	6,498
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Industry Applications	1,756
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Energy Conversion	2,326

FONTE: O autor (2016)

De forma ilustrativa, também foi consultada a classificação Qualis dos periódicos selecionados (TABELA 5).

TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO QUALIS DOS PERIÓDICOS SELECIONADOS

BASE DE DADOS	PERIÓDICOS	QUALIS
Scopus (Elsevier)	Energy Conversion and Management	Não consta
SciVerse ScienceDirect (Elsevier)	Futures	Não consta
SpringerLink	Energy Efficiency	Não consta
SpringerLink	Annual Review of Environment and Resources	Não consta
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Power Systems	A1
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Power Electronics	A1
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Power Delivery	A1
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Industrial Electronics	A1
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Industry Applications	A1
IEEE Journals and Magazines	IEEE Transactions on Energy Conversion	A1

FONTE: O autor (2016)

Com base nos periódicos com maior fator de impacto dentro das bases de dados (TABELA 4), foram escolhidas as bases de dados com resultados mais relevantes, resultando na escolha de quatro bases de dados (TABELA 6).

TABELA 6 - BASES DE DADOS SELECIONADAS

BASE DE DADOS	i+i	i+ii	i+iii	TOTAL
Scopus (Elsevier)	101	64	85	250
SciVerse ScienceDirect (Elsevier)	47	38	52	137
SpringerLink	23	9	14	46
IEEE Journals and Magazines	9			9
Total por pesquisa	180	111	151	442

FONTE: O autor (2016)

Postos os 442 periódicos (TABELA 6), iniciou-se a pré-análise dos artigos. Esta etapa consistiu na análise dos títulos e resumos dos artigos, a fim de se verificar de forma preliminar a pertinência dos artigos encontrados com o tema pesquisado. Através de uma filtragem realizada com a análise dos títulos dos artigos, o número de artigos para uma análise aprofundada foi reduzido (TABELA 7).

TABELA 7 - ARTIGOS PARA PRÉ-ANÁLISE

PESQUISAS REALIZADAS	ARTIGOS ENCONTRADOS
i + i eficiência energética e redes elétricas inteligentes	113
i + ii eficiência energética e gerenciamento pelo lado da demanda	66
i + iii eficiência energética e resposta a demanda	93
Total de artigos selecionados para pré-análise	272

FONTE: O autor (2016)

A partir dos artigos selecionados (TABELA 7), procedeu-se a análise detalhada do material coletado (TABELA 8). A primeira etapa consistiu em uma pré-análise do material, através da leitura do título e dos resumos dos artigos para verificar a pertinência com o tema pesquisado. A segunda fase objetivou verificar, através de uma leitura seletiva dos artigos verificados na pré-análise, se os mesmos possuem fatos e resultados aplicáveis ao tema pesquisado, através da verificação da parte introdutória e conclusão dos trabalhos. Por fim, foram selecionados seis artigos para uma análise crítica (TABELA 8), as quais estão dispostas nas subseções seguintes deste capítulo.

TABELA 8 - RESUMO DAS ANÁLISES DOS ARTIGOS

PESQUISAS	PRÉ-ANÁLISE	LEITURA SELETIVA	ANÁLISE CRÍTICA
i + i	113	12	3
i + ii	66	7	1
i + iii	93	8	2
Total de artigos	272	27	6

FONTE: O autor (2016)

3.2.1 Eficiência energética e redes elétricas inteligentes

Yilmaz e Krein (2013) exploram a questão dos veículos elétricos conectados às redes elétricas inteligentes, abordando questões tecnológicas e requisitos para conexões unidirecionais e bidirecionais de fluxo de potência, bem como interfaces e estratégias de carregamento e fornecimento de energia para a rede pelos veículos elétricos.

Segundo os autores, veículos elétricos conectáveis à rede elétrica podem se tornar cargas controláveis do sistema elétrico. Veículos elétricos conectados a um sistema elétrico unidirecional, tal qual é o sistema elétrico atual, podem resultar em um aumento significativo na demanda total do sistema. Por outro lado, existindo um fluxo de potência bidirecional no sistema elétrico, o veículo elétrico pode até ser benéfico para o sistema. Segundo Yilmaz e Krein (2013), os veículos elétricos podem ser utilizados para controle de tensão e frequência na rede elétrica. Atualmente o controle de frequência é realizado com a atuação em grandes centrais de geração, o que é custoso. Promissoras tecnologias de carregamento e descarregamento rápido de baterias de carros elétricos são uma alternativa promissora para auxiliar a regulação de frequência da rede elétrica. O controle de tensão, por sua vez, pode ser realizado através da injeção de energia reativa na rede. Veículos elétricos podem fornecer energia reativa, tanto indutiva quanto capacitiva, dependendo do inversor de frequência que o veículo elétrico possuir.

Outro benefício citado é o nivelamento de carga no sistema elétrico. Os veículos elétricos, se conectados à rede e com uma estratégia adequada de controle, podem ser utilizados para fornecer energia (descarregamento) para a rede em períodos críticos e absorver energia (carregamento) em períodos em que o sistema estiver subutilizado.

Por fim, Yilmaz e Krein (2013) citam os benefícios da integração dos veículos elétricos com fontes renováveis de energia. Diversos autores propuseram sistemas de controle, visando sincronizar as estratégias de carregamento dos veículos elétricos com energia solar, cujo pico de produção ocorre geralmente fora do pico de demanda do sistema elétrico, e com energia eólica, sendo esta mais complexa, uma vez que os ventos são mais difíceis de prever.

Palensky e Kupzog (2013) apresentam um resumo das pesquisas que estão sendo feitas atualmente sobre redes elétricas inteligentes. Entre os assuntos mais proeminentes neste tema, destacam-se os medidores inteligentes, uma vez que a partir deles espera-se que os consumidores tenham um maior acesso a informações sobre o seu uso da energia, permitindo que estes possam realizar ações de eficiência energética. Estas ações normalmente não ocorrem voluntariamente, mas sim como resposta a um correto incentivo, a ser obtido através de uma estratégia de tarifação dinâmica.

A economia de energia a ser obtida através de tarifação dinâmica depende, dentre uma série de variáveis, do agente que irá realizar as ações. Ações tomadas por pessoas tendem a não ser tão efetivas quanto desejadas, quando se trata de resposta a uma tarifação diferenciada. Um sistema de gerenciamento automático de cargas é mais adequado neste caso, uma vez que este tem condições de levar em consideração no controle de demanda questões como inércia térmica (ar-condicionados e aquecedores) e cargas programáveis (lavadoras de roupas e louças, por exemplo).

Segundo Palensky e Kupzog (2013), indiscutivelmente uma das questões centrais em todos os aspectos das redes elétricas inteligentes são os sistemas de informação e comunicação. Com o aumento do fluxo de informações e da importância dos dados que eles representam (perfis de consumo, por exemplo), a segurança nas informações passa a ser um ponto chave para as redes elétricas inteligentes.

Brown (2014) cita que a maioria dos programas de eficiência energética e políticas sobre este tema foram implantadas em países industrializados, sendo que ainda existe um grande potencial para ações de eficiência energética em países em desenvolvimento que deve ser explorado. Para tanto é necessário um planejamento de ações que reflita as condições dos serviços de energia elétrica bem como as particularidades dos mercados envolvidos.

Deve-se observar não somente a ineficiência de um determinado equipamento, mas sim do sistema como um todo. Ao olhar somente o potencial de ações de eficiência energética em um uso final, tem-se uma ideia subestimada do real potencial de economia de energia.

Segundo Brown (2014), ao observar somente a eficiência do uso final propriamente dito (lâmpada incandescente), percebe-se um potencial elevado para ações de eficiência energética. Por outro lado, observando o sistema como um todo, verifica-se um potencial ainda maior, demonstrando que as ações de eficiência energética podem ser aplicadas em toda a cadeia de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, não ficando restritas aos usos finais diretamente.

Brown (2014) também disserta sobre a arquitetura das redes elétricas inteligentes. Segundo o autor, a arquitetura das redes elétricas inteligentes pode integrar uma série de componentes, incluindo grandes centrais de geração, pequenas centrais de geração distribuída, centrais de armazenamento de energia, controladores de demanda e veículos elétricos. É apresentado um esquema de uma rede elétrica inteligente, no qual tanto a energia elétrica quanto os fluxos de informações trafegam em vias bidirecionais entre as distribuidoras e os consumidores, diferentemente das redes elétricas convencionais, no qual a energia flui unidirecionalmente dos geradores, passando pelas distribuidoras e chegando até o consumidor final.

Brown (2014) espera que, ao colocar em funcionamento uma arquitetura de rede elétrica inteligente, os sistemas elétricos possam operar em níveis superiores de qualidade e segurança. Ações para redução de consumo em redes elétricas inteligentes podem ser promovidas através de precificação dinâmica e o uso de medidores inteligentes, os quais dariam os subsídios para que os consumidores tomassem atitudes ativamente para redução do consumo. Sistemas de precificação dinâmica são mais eficientes utilizando sistemas digitais de comunicação e podem, inclusive, auxiliar na redução de perdas não técnicas ou comerciais, ou seja, ligações irregulares e furtos de energia. Ressalta-se por fim que, enquanto não houver uma operacionalização das redes elétricas inteligentes, o potencial total de tecnologias em franco desenvolvimento não poderá ser totalmente aproveitado, tais como painéis fotovoltaicos, carros elétricos, programas de gerenciamento pelo lado da demanda e amplas centrais de geração a partir de fontes renováveis (fazendas eólicas e fazendas solares).

3.2.2 Eficiência energética e gerenciamento pelo lado da demanda

Gellings e Samotyj (2013) abordam inicialmente cinco aspectos que os autores consideram que as redes elétricas inteligentes deverão possuir no futuro: (i) a capacidade de visualizar o estado do sistema elétrico em tempo real, facilitando a operação do sistema; (ii) o aumento na capacidade do sistema elétrico, através de melhorias e aumento nas formas de controle das redes de transmissão em alta tensão; (iii) eliminação de gargalos no sistema elétrico, melhorando assim a estabilidade do sistema como um todo; (iv) permitir sistemas de recomposição automática das redes elétricas; e (v) permitir sistemas de comunicação com os consumidores finais.

Segundo os autores, através destes cinco aspectos será possível a realização de programas mais efetivos de gerenciamento pelo lado da demanda. Atualmente, as práticas de gerenciamento energético são compostas basicamente por sete aspectos, aplicados de forma individual ou simultânea: (i) acompanhamento das características de utilização do sistema para identificação de áreas problemáticas; (ii) melhoras na operação e manutenção de sistemas existentes de uso final de energia elétrica, incluindo, por exemplo, reaproveitamento energético; (iii) substituição de equipamentos ineficientes por outros mais eficientes; (iv) estratégias para mudança na curva de carga do sistema, através de ações como, por exemplo, armazenamento de energia térmica; (v) instalação de sistemas de automação, permitindo assim um maior controle e uma maior gama de possibilidades de atuações para redução de consumo; (vi) estratégias de resposta à demanda e (vii) o uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica.

Gellings e Samotyj (2013) definem gerenciamento pelo lado da demanda como o planejamento, implementação e monitoramento de ações voltadas para influenciar o consumidor final de energia elétrica, de forma a produzir uma variação desejada na curva de carga do sistema elétrico. Um sistema de gerenciamento pelo lado da demanda geralmente aborda aspectos críticos do planejamento do sistema elétrico:

- as ações devem influenciar o comportamento do consumidor final. Qualquer programa que vise esta influencia é considerado um programa de gerenciamento pelo lado da demanda;
- as ações devem atingir objetivos específicos. Para se obter uma mudança na curva de carga, alguns objetivos devem ser atingidos para que essa

mudança seja alcançada e mantida, como por exemplo redução de tarifas em determinados períodos do dia, melhoras na satisfação do consumidor, entre outros;

- resultados obtidos devem ser confrontados com os custos de expansão do sistema elétrico, fazendo assim parte do planejamento do sistema elétrico como um todo;
- deve ser identificado como o consumidor irá responder e não como ele deveria responder, uma vez que ações impositivas e não pragmáticas tendem a ser ineficazes;
- as ações a serem realizadas são influenciadas pelo formato da curva de carga do sistema elétrico, devendo as ações objetivar reduções de picos de demanda ou preenchimento de vales, por exemplo.

Para se garantir a efetividade de programas de gerenciamento pelo lado da demanda são necessárias tecnologias que permitam uma adequada resposta à demanda, ou seja, trata-se de um mecanismo no qual os consumidores tomam ações em resposta a um sinal dado pela distribuidora de energia elétrica. Segundo Gellings e Samotyj (2013), os avanços tecnológicos são considerados pontos chave para sistemas de resposta a demanda, devendo ser previstos:

- medidores elétricos inteligentes, com comunicação bidirecional, o que possibilitaria a capacidade de prover acesso contínuo do histórico de consumo para os consumidores finais de energia elétrica;
- canais múltiplos e de interface amigável para comunicar os consumidores sobre valores de tarifação dinâmica, eventuais eventos emergenciais, etc;
- ferramentas que permitam um acesso em tempo real ao consumo das instalações, permitindo o diagnóstico de potenciais ações a serem tomadas;
- estratégias de redução de demanda que potencializem precificação diferenciada de acordo com a situação do sistema elétrico;
- utilização de controladores de carga e sistemas de gerenciamento energético, facilitando a automação para o usuário final;

- outras formas de suprimento energético no caso de uma falha na distribuição de energia principal, por exemplo, geradores elétricos ou bancos de baterias.

3.2.3 Eficiência energética e resposta a demanda

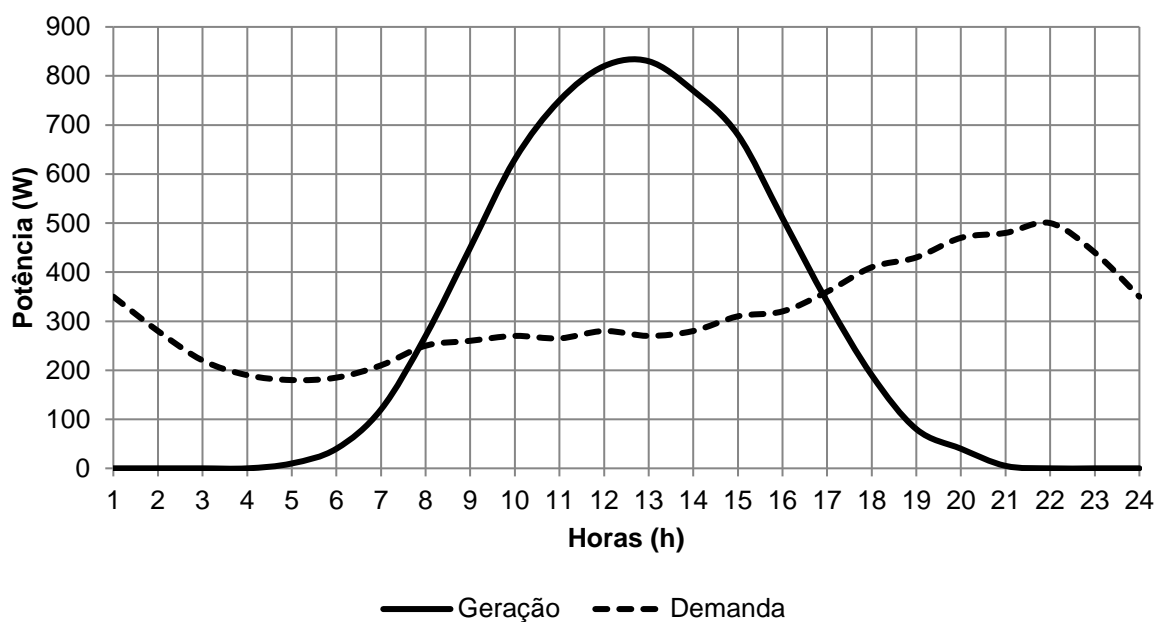
Moura *et al.* (2013) apresenta uma revisão do papel das redes elétricas inteligentes para o aumento da eficiência energética no sistema elétrico, focando principalmente no setor residencial europeu. Este foco justifica-se uma vez que se estima que até 2050 haja um aumento na demanda por energia elétrica entre 36% a 39% na Europa, sendo o setor residencial o principal responsável por este aumento.

Este aumento na demanda no setor residencial é explicado pelo aumento das cargas eletrônicas (MOURA *et al.*, 2013), as quais representam mais de 20% do consumo médio residencial europeu. Tais cargas consistem de sistemas de entretenimento com alto consumo em modo de espera, com o consumo médio anual destes sistemas em modo de espera estimado em 7% de uma residência europeia.

Moura *et al.* (2013) cita que o sistema elétrico atual foi planejado e é operado sobre a premissa que a geração deve suprir todas as necessidades do consumidor final, sem nenhum controle. Esta premissa começou a mudar quando foram propostas as primeiras ações de resposta à demanda na década de 1980.

As ações de resposta a demanda são usadas tradicionalmente para forçar direta ou indiretamente uma redução de consumo em períodos críticos, sendo usados para balancear a demanda com o suprimento de energia elétrica. Moura *et al.* (2013) argumenta que, com o advento das redes elétricas inteligentes, as ações de resposta à demanda podem ser utilizadas para melhorar a estabilidade do sistema elétrico e reduzir instantaneamente o consumo de energia elétrica de forma a evitar problemas que podem ocorrer como resultado do descasamento que ocorre do pico de geração das fontes renováveis de energia elétrica com o pico de demanda por energia elétrica (GRÁFICO 1).

GRÁFICO 1 - GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DEMANDA RESIDENCIAL



FONTE: Adaptado de Moura *et al.* (2013)

As redes elétricas inteligentes, segundo Moura *et al.* (2013), podem ter um papel chave para prover informações sobre o monitoramento em tempo de real de edifícios e residências, provendo ainda condições para as cargas sejam controladas remotamente, contribuindo para a redução do consumo de energia e otimização da estrutura existente das redes elétricas.

A evolução das redes elétricas convencionais para as inteligentes não se dará em um único passo. Moura *et al.* (2013) cita que até o momento tem se dado um foco muito grande para o desenvolvimento de sistemas de medição inteligente. Como grande parte desses sistemas de medição possui fluxo de informação unidirecional, o próximo passo seria o desenvolvimento de sistemas bidirecionais de comunicação, provendo assim uma ferramenta que possibilite o gerenciamento de cargas e proteção de receita (redução de perdas técnicas e comerciais).

Durante a evolução das redes elétricas inteligentes, Moura *et al.* (2013) explica que foram identificados três gerações distintas das redes elétricas inteligentes:

- redes elétricas inteligentes 1.0: são os primeiros passos das redes inteligentes iniciados hoje, os quais visam transformar as redes elétricas convencionais utilizando sistemas avançados de comunicação para prover sistemas de pré-pagamento, sistemas de acompanhamento de consumo voltados para os consumidores finais, sistema inteligente de corte de carga,

melhoramento do controle de carga nas redes elétricas, medição bidirecional e ações de resposta à demanda;

- redes elétricas inteligentes 2.0: chamada de rede com inteligência residente, permitirá um aprimoramento nas aplicações das redes elétricas inteligentes, tais como micro redes com geração distribuída, iluminação pública inteligente, conexões com veículos elétricos inteligentes, armazenamento e distribuição de energia elétrica gerada a partir de fontes renováveis, predição de falhas e sobrecargas no sistema elétrico e sistemas de resposta automática à demanda;
- redes elétricas inteligentes 3.0: irá tornar a rede elétrica totalmente gerenciável, estendendo as aplicações e utilizando o potencial total da inteligência residente das redes elétricas. As redes elétricas inteligentes avançadas serão um meio não só de se aumentar a eficiência energética das redes elétricas, mas também uma plataforma para novos modelos de negócio, mercado, aplicações, serviços e relacionamentos.

Al-Mulla e Elsherbini (2014) demonstram um sistema piloto de gerenciamento de demanda, utilizando a estrutura existente nos edifícios e mantendo a aceitação do consumidor final. Este piloto foi realizado no Kuwait, um país com preços altamente subsidiados de energia elétrica, o que dificulta a viabilidade das ações de eficiência energética. Por outro lado, devido ao clima do país, grande parte das cargas (e o principal foco do estudo) são cargas de climatização, ou seja, ares-condicionados.

Para este piloto, seis edifícios foram conectados a uma rede de gerenciamento de demanda, objetivando um controle centralizado dos ares-condicionados. Nota-se que os ares-condicionados são a principal carga do sistema (TABELA 9). Os edifícios selecionados para este piloto representam mais de 60% de todas as construções existentes no Kuwait, correspondendo a aproximadamente 80% da demanda total por energia elétrica no país.

TABELA 9 - SISTEMA PILOTO DE GERENCIAMENTO DE DEMANDA

EDIFÍCIOS	NÚMERO DE ARES-CONDICIONADOS	DEMANDA TOTAL	DEMANDA DA CLIMATIZAÇÃO
Vila residencial	7	82 kW	56 kW
Prédio de apartamentos	11	98 kW	67 kW
Mesquita	8	125 kW	86 kW
Escola	118	435 kW	320 kW
Escritório governamental	10	282 kW	200 kW
Escritório governamental	12	368 kW	260 kW

FONTE: Al-Mulla e Elsherbini (2014)

Al-Mulla e Elsherbini (2014) citam que o aspecto mais importante deste sistema é o sistema de gerenciamento de potência, tendo como principal função o ajuste do funcionamento dos ares-condicionados. Este sistema atua aumentando a temperatura interna de referência dos ares-condicionados com menor prioridade, continuando até que se atinja um patamar desejável de demanda. Aumentando essa temperatura de referência, a potência dos ares-condicionados é reduzida e em alguns casos os equipamentos eram desligados. A temperatura interna dos edifícios é monitorada e levada em consideração na determinação das prioridades de atuação ou desligamento, de forma a não aumentar acima de um determinado patamar, assegurando assim o conforto térmico dos habitantes.

O piloto foi comissionado e testado durante um período de trinta dias e continuou operando durante os quatro meses seguintes. Diversos cenários foram testados, inclusive em um destes houve período de férias, resultando em uma grande desocupação das vilas residenciais, possibilitando uma nova lógica de controle dos sistemas de climatização.

Al-Mulla e Elsherbini (2014) afirmam que com a realização deste piloto pode-se verificar a viabilidade das ações de resposta à demanda. Os resultados obtidos foram extrapolados para todo o país, de forma que se pode verificar o impacto que a aplicação em larga escala deste sistema causaria (TABELA 10).

TABELA 10 - RESULTADOS DAS AÇÕES DE RESPOSTA A DEMANDA

EDIFÍCIOS	UNIDADES	ECONOMIA INDIVIDUAL		ECONOMIA PARA O PAÍS	
		DEMANDA	ENERGIA	DEMANDA	ENERGIA
Vila residencial	105.062	15%	7%	0,79 GW	6,18 GWh
Mesquita	1.062	0%	18%	0,00 GW	0,33 GWh
Escola	965	74%	20%	0,23 GW	0,89 GWh
Escritórios governamentais	1.014	71%	20%	0,14 GW	0,59 GWh

FONTE: Al-Mulla e Elsherbini (2014)

Com os valores estimados de economia para o país (TABELA 10) e através de uma projeção de impacto que estas ações causariam se aplicadas em larga escala até o ano de 2030, Al-Mulla e Elsherbini (2014) estimou uma redução de 3,44 GW entre a projeção de demanda do país, com e sem as ações de resposta a demanda. Esta redução de 3,44 GW representaria, em valores atuais, cerca de 4,13 bilhões de dólares, utilizando como base os custos atuais de geração e expansão das redes de distribuição. Al-Mulla e Elsherbini (2014) também estima uma economia de 12,7 GWh de economia de energia elétrica durante um único verão com a aplicação em larga escala deste piloto.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A partir da revisão da literatura apresentada neste capítulo, pode-se confirmar o quão extenso é o esforço da comunidade científica no desenvolvimento das redes elétricas inteligentes. Diversos são os estudos focando no desenvolvimento e conceitos que precisam ser desenvolvidos para viabilização das redes elétricas inteligentes (BROWN, 2014).

Para o desenvolvimento das redes elétricas inteligentes não basta apenas o foco em questões ligadas diretamente à expansão e melhoria das redes elétricas de distribuição, mas devem-se visar também os futuros consumidores finais desta energia, ou melhor, os equipamentos elétricos que estes consumidores possuirão quando as redes elétricas inteligentes estiverem em operação.

Cada vez mais os usos finais, sejam eles de qualquer natureza, como veículos elétricos (YILMAZ; KREIN, 2013) ou sistemas de climatização (AL-MULLA; ELSHERBINI, 2014), tendem a serem dotados de mais recursos de forma a aproveitar ao máximo os benefícios oferecidos por uma rede elétrica inteligente. De forma

simultânea, este aumento de carga deve ser estudado durante o desenvolvimento das redes elétricas inteligentes, evitando assim o surgimento de efeitos indesejados no sistema elétrico.

Dentre as ações estudadas pela comunidade científica, destacam-se aquelas voltadas à redução de demanda nas redes elétricas, sejam sistemas de gerenciamento pelo lado da demanda ou sistemas de resposta a demanda. Diversas estratégias de gerenciamento estão sendo concebidas (GELLINGS; SAMOTYJ, 2013) e alguns projetos pilotos estão sendo desenvolvidos (AL-MULLA; ELSHERBINI, 2014).

Invariavelmente percebe-se que as redes elétricas inteligentes estão ainda em seus primeiros passos (MOURA *et al.*, 2013). Dentro deste cenário, percebe-se a importância deste assunto, tanto do ponto de vista do desenvolvimento científico e tecnológico, desenvolvendo os sistemas que controlarão as redes elétricas no futuro, quando do ponto de vista do meio ambiente, em que as ações de economia de energia e redução de demanda são cruciais para a postergação de investimento em usinas e redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, postergando ou evitando maiores danos ao meio ambiente dos que já foram causados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão discutidas questões relacionadas aos materiais empregados e aos métodos utilizados na presente pesquisa.

4.1 MATERIAIS

Neste tópico são analisados os materiais empregados nesta dissertação, desde a pesquisa de usos e posse de equipamentos, que será a base para a seleção de quais equipamentos são mais recorrentes, do arcabouço regulatório que permeia o tema, até as tecnologias que podem ser aplicadas em ações de eficiência energética voltadas para o setor residencial.

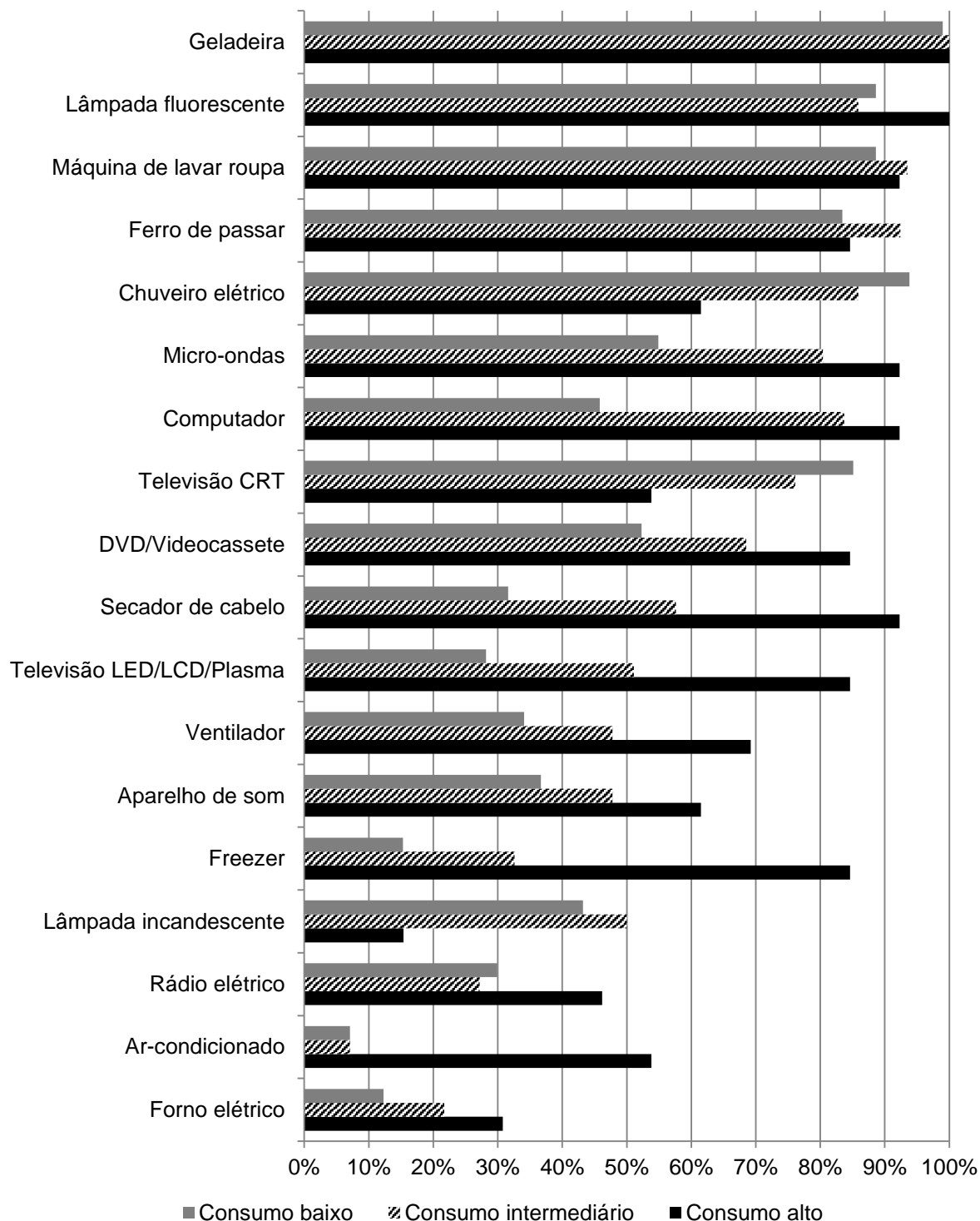
4.1.1 Pesquisa de usos e posses de equipamentos

Visando uma maior assertividade na proposição de ações de eficiência energética, é necessário conhecer os equipamentos que são mais recorrentes em consumidores de energia elétrica. Segundo dados coletados pela Companhia Paranaense de Energia - Copel (2012), por meio de pesquisa de usos e posse de equipamentos de consumidores residenciais urbanos, foi possível definir o perfil médio de uso da energia elétrica dos consumidores residenciais atendidos pela Companhia. Os consumidores entrevistados foram segregados em três grupos:

- consumo baixo: consumo entre 0 até 220 kWh, com renda predominante de até quatro salários mínimos;
- consumo intermediário: consumo entre 221 kWh até 500 kWh, com renda familiar predominante de quatro até nove salários mínimos;
- consumo alto: consumo acima de 501 kWh e renda familiar superior a nove salários mínimos.

Os dados coletados na pesquisa de usos e posse de equipamentos de consumidores residenciais urbanos foram agrupados de forma gráfica a seguir (GRÁFICO 2), visando proporcionar uma melhor visualização da ocorrência de equipamentos que consomem energia elétrica em residências.

GRÁFICO 2 - POSSE DE EQUIPAMENTOS DE CONSUMIDORES DA COPEL



FONTE: Adaptado de Copel (2012)

4.1.2 Análise regulatória

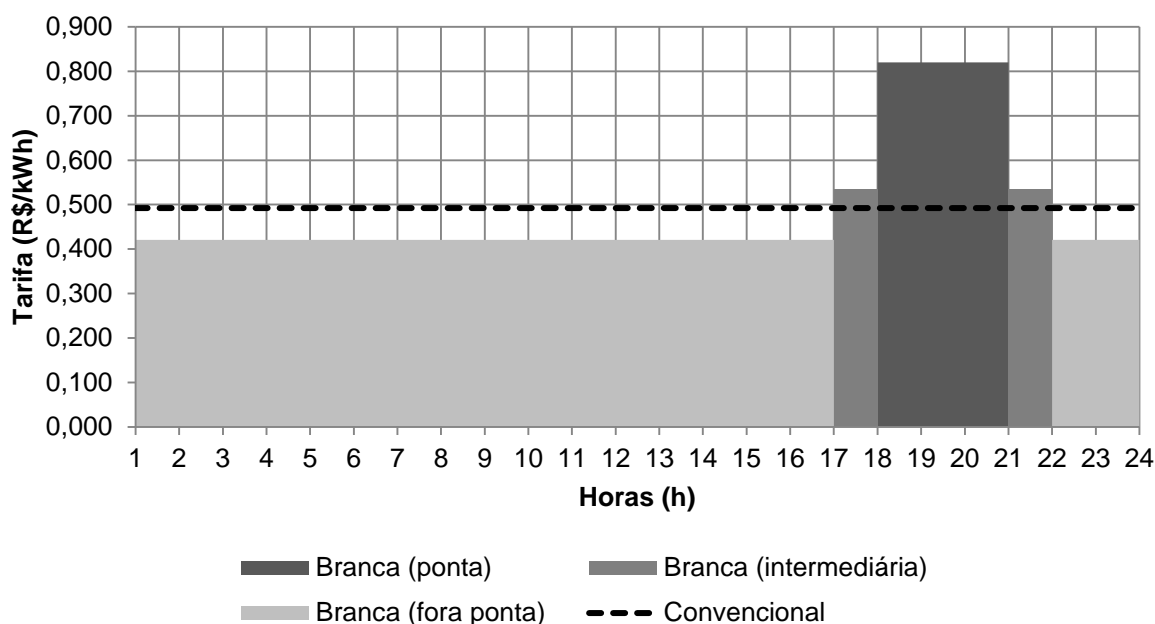
Através da Lei Federal 9.991, de 24 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), impõe-se ao concessionário ou permissionário de energia elétrica a aplicação de uma parcela

mínima de sua renda operacional líquida (ROL) em ações de combate ao desperdício de energia elétrica e eficiência energética, sendo que o disciplinamento para aplicação de tais recursos será dado pela Agência Nacional de Energia Elétrica.

Com o intuito de fomentar a eficiência energética em âmbito nacional, foi publicada a Lei Federal 10.295, de 17 de outubro de 2001 (BRASIL, 2001), estipulando o estabelecimento de metas mínimas e periodicamente revisáveis para que os equipamentos que consomem energia elétrica devam atender, em termos de eficiência energética. Tal lei constitui marco importantíssimo, uma vez que força que os equipamentos sejam cada vez mais eficientes. Em um primeiro momento, este aumento de eficiência se deu com a melhora propriamente dita do equipamento, ou seja, a redução de energia elétrica que os equipamentos utilizam para produzir um determinado efeito útil. É possível que, em um segundo momento, com os corretos incentivos e proporcionamento de um ambiente favorável, que este aumento da eficiência energética se de melhorando a “inteligência” dos equipamentos, ou seja, que o próprio equipamento, utilizando dados disponíveis como, por exemplo, o preço em tempo real da energia elétrica, possa se adaptar automaticamente para consumir energia prioritariamente nos horários em que a energia for mais barata. Esta “inteligência” poderá contribuir com a melhoria do sistema elétrico como um todo, podendo refletir em um melhor aproveitamento do sistema, possibilitando uma redução tarifária para toda a sociedade.

Outro passo importante para a melhoria da eficiência energética no Brasil foi dado com a criação da tarifa horária branca, através da Resolução Normativa 479, de 3 de abril de 2012 (ANEEL, 2012a). Diferentemente da tarifa convencional, que estabelece uma tarifa única para todos os períodos, esta tarifa define valores diferenciados de acordo com o período do dia, sendo caracterizados como tarifa de ponta, intermediária e fora de ponta (GRÁFICO 3). Esta estrutura vale para dias úteis, uma vez que nos demais dias (finais de semana e feirados) não existe um “horário de ponta”, valendo para estes períodos somente a tarifa fora de ponta. A partir deste marco, surge o primeiro incentivo concreto para o aumento da inteligência dos equipamentos, uma vez que através desta tarifação pode-se obter o sinal necessário para que um equipamento “inteligente” possa se adaptar e consumir energia elétrica nos períodos em que esta for mais barata.

GRÁFICO 3 - ESTRUTURA DA TARIFA BRANCA EM DIAS ÚTEIS



FONTE: Adaptado de ANEEL (2015), sem impostos

A última atualização nas regras do Programa de Eficiência Energética foi realizada através da publicação da Resolução Normativa 556, de 18 de junho de 2013 (ANEEL, 2013b), no qual foram instituídos os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (Propee), sendo este um guia determinativo de procedimentos para as distribuidoras de energia elétrica executarem seus Programas de Eficiência Energética. No Propee estão definidos os critérios que tornam um projeto de eficiência energética elegível para utilização de recursos do PEE. Tal ponto é crucial, uma vez que os recursos do PEE constituem o maior fundo para ações de eficiência energética em âmbito nacional, representando anualmente cerca de R\$ 450 milhões destinados exclusivamente para otimização do setor elétrico. Vislumbra-se que, com o amadurecimento do mercado de soluções eficientes, referindo-se especialmente às soluções utilizando recursos de redes elétricas inteligentes, o PEE poderá ser uma das mais importantes fontes de recursos para estas soluções.

4.1.3 Sistemas de iluminação

A primeira fonte de luz que utilizava energia elétrica foi construída em 1802 por Humphry Davy, químico britânico que utilizou um filamento de platina para produzir luz com a passagem de corrente elétrica. Já a primeira lâmpada comercialmente

disponível foi criada em 1879 por Thomas Alva Edison, inventor norte-americano, utilizando um filamento de carbono para produção de luz.

O princípio de funcionamento das lâmpadas incandescentes permanece o mesmo desde 1879, sendo somente aperfeiçoados os materiais utilizados na sua construção. Este tipo de tecnologia é altamente ineficiente, sendo que, em média, 90% de toda a energia consumida pela lâmpada é convertida em energia térmica (calor) e somente os 10% restantes em energia luminosa (luz). Este tipo de lâmpada tornou-se muito comum nas residências do mundo inteiro.

Com o passar do tempo surgiram as lâmpadas fluorescentes, vindo a substituir em partes as lâmpadas incandescentes em residências, devido à sua melhor relação custo-benefício. O tubo de vidro da lâmpada é coberto com um material à base de fósforo. Este, quando excitado com radiação ultravioleta gerada pela ionização dos gases presentes na lâmpada, o que ocorre com a aplicação de um gradiente de tensão, produz luz visível.

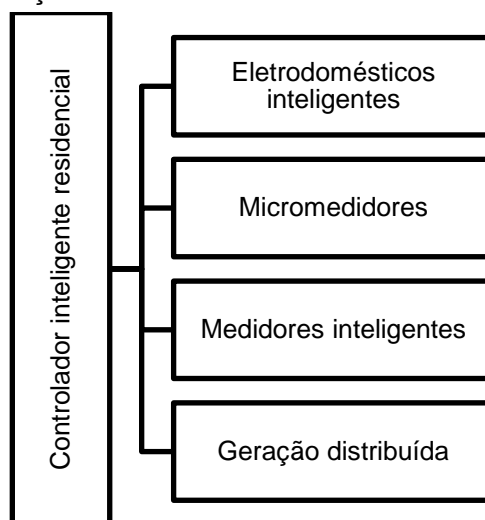
A grande inovação tecnológica para sistemas de iluminação atualmente é a aplicação de lâmpadas utilizando tecnologia LED (do inglês, *light emitting diode*). Através desta tecnologia, houve um salto em termos de eficiência luminosa e vida útil. O LED consiste em um diodo semicondutor (junção P-N) que, quando submetido a uma determinada tensão elétrica, emite luz visível. Esta emissão de luz ocorre quando, ao polarizar a junção de semicondutores, ocorre uma recombinação de lacunas e elétrons nestes semicondutores. Esta recombinação exige que a energia do elétron livre não ligado seja transferida para outro estado inferior. Essa recombinação exige que a energia dos elétrons seja liberada, o que ocorre na forma de fótons de luz.

Existem também dispositivos para controle de equipamentos de iluminação, os *dimmers*. Estes dispositivos são utilizados para variar a intensidade luminosa produzida pelas lâmpadas. Seja por motivos tecnológicos ou mercadológicos, esta tecnologia é atualmente difundida em baixa escala em residências.

4.1.4 Sistema inteligente de medição e controle residencial

Di Giorgio *et al.* (2011) ilustra um esquema genérico de um sistema inteligente de medição e controle residencial (FIGURA 6).

FIGURA 6 - SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE RESIDENCIAL



FONTE: Adaptado de Di Giorgio *et al.* (2011)

O principal componente desta arquitetura é o controlador inteligente residencial (CIR), sendo responsável pela gestão das cargas em uma residência e de eventuais fontes de geração distribuída. Os ganhos em termos de eficiência energética com este componente serão obtidos através dos seus subcomponentes.

Eletrodomésticos inteligentes foram previstos nesta estrutura e devem ser capazes de fornecer uma previsão de consumo de energia para cada horário solicitado e qual será seu consumo em um próximo momento. Devido ao estágio de desenvolvimento tecnológico das redes elétricas inteligentes, estes equipamentos são escassos no mercado e, portanto, não farão parte deste estudo. Os demais itens previstos nesta estrutura estão descritos a seguir.

4.1.4.1 Tomadas inteligentes

Tomadas inteligentes são dispositivos dotados de micromedidores inteligentes de energia. Estes micromedidores são medidores de energia com baixo custo de fabricação, tamanho reduzido e com um canal de comunicação bidirecional direta com o medidor central de uma residência, ou com um controlador central de cargas, podendo ser instalado diretamente em um eletrodoméstico ou circuito isolado de baixa tensão. Sua função é medir o consumo individualizado de cada carga, sendo que esse dispositivo também possibilita o corte via comando remoto, agendamento ou sobrecarga (CUSTÓDIO, 2013).

O equipamento pode ter a capacidade de reconhecer a categoria dos aparelhos conectados a ele e, de acordo com uma escala de prioridades, definir como essa carga deve ser tratada. Este equipamento tem baixo custo de aplicação e capacidade de medir e registrar o consumo de energia instantânea da carga conectada. Com a utilização destas tomadas é possível, utilizando um algoritmo de controle, reduzir o consumo de energia de uma residência.

Este dispositivo pode ser utilizado também para controle de cargas em uma residência. Juntamente com um medidor inteligente de energia, eletrodomésticos inteligentes e uma central de controle residencial, é possível incluir uma residência em uma estrutura de funcionamento de uma rede elétrica inteligente. Usado para controle de eletrodomésticos de grande potência e do sistema de iluminação de uma residência, uma das principais funções da tomada inteligente é receber comandos de uma central de controle, medir o consumo da carga e em seguida transmitir os valores para a central e providenciar proteção para carga em caso de problemas com a da energia fornecida pela concessionária de energia.

Uma tomada inteligente pode também, com base nos dados medidos e coletados ao longo de um determinado tempo, criar um perfil de uso padrão e, se o usuário desejar, desconectar equipamentos da rede, evitando que estes consumam energia em modo de espera quando não utilizados. A tomada inteligente pode definir, por exemplo, um determinado período para manter o equipamento conectado à tomada, desta forma mantendo o consumo em modo de espera, para somente após este tempo desconectar o equipamento da rede elétrica. Este tempo poderá ser definido com base nos dados coletados pela tomada inteligente.

Com as tomadas inteligentes é possível monitorar o consumo de um equipamento ou circuito, disponibilizando esta informação para o usuário final ou para um programa de controle de demanda, levantando o perfil de consumo através do qual é possível determinar automaticamente uma forma melhor de operação e estratégias de utilização, de acordo com a tarifa de energia elétrica vigente.

4.1.4.2 Medidores inteligentes

Os medidores inteligentes de energia são uma parte essencial das redes elétricas inteligentes e estão na fronteira entre a concessionária e a unidade

consumidora, sendo que a implantação em massa de sistemas de medição inteligente já é realidade em alguns países.

Através da utilização destes dispositivos é possível manter um canal de comunicação direto entre a concessionária e seus consumidores, traçando perfis de consumo diários, permitindo realizar cortes de residências ou grupos em situações críticas e até comandar eletrodomésticos remotamente (CUSTÓDIO, 2013).

Internamente, os medidores inteligentes agregam funções dos já difundidos medidores eletrônicos. Outras funções podem ser adicionadas, como interfaces de comunicação, memória de massa e criptografia de dados, função de corte e religamento, pré-pagamento, geração distribuída e tarifação horária diferenciada.

4.1.4.3 Geração distribuída

Geração distribuída consiste em uma central geradora de energia elétrica, que utilize fonte energética com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Para fins regulatórios, em sistemas de pequeno porte foram definidas duas situações através da Resolução Normativa ANEEL 482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012b), e atualizada através da Resolução Normativa ANEEL 687, de 24 de novembro de 2015 (ANEEL, 2015b):

- microgeração distribuída: potência instalada menor ou igual a 75 kW;
- minigeração distribuída: potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para energia hidráulica ou menor ou igual a 5 MW para energia solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.

De forma a incentivar a inserção de geração distribuída foi estabelecido um sistema de compensação, no qual a energia ativa injetada através da unidade consumidora é cedida, por meio de um empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, a ser consumida em um prazo de trinta e seis meses.

A potência instalada da microgeração ou minigeração distribuída participante do sistema de compensação de energia elétrica fica limitada à carga instalada, no

caso de unidade consumidora do grupo B (baixa tensão), ou à demanda contratada, no caso de unidade consumidora do grupo A (alta tensão).

4.2 MÉTODOS

Neste tópico são analisados os métodos empregados nesta dissertação, descrevendo de que forma as informações levantadas serão aplicadas e de que forma será realizada a simulação das ações de eficiência energética.

4.2.1 Utilização da pesquisa de usos e posses de equipamentos

A pesquisa de usos e posses de equipamentos é uma ferramenta importante para a que a concessionária possa desenvolver estudos de previsão de demanda, necessários ao planejamento dos sistemas elétricos de distribuição (COPEL, 2012).

Para esta dissertação, a pesquisa de usos e posses de equipamentos será utilizada para se verificar quais são os equipamentos mais comuns em residências que utilizam energia elétrica, bem como seu perfil médio de uso, o que permitirá estimar a economia de energia que poderá ser obtida através da execução de ações de eficiência energética nestes equipamentos.

4.2.2 Sistemas de iluminação

Em se tratando de ações de eficiência energética, é imprescindível a correta escolha da tecnologia a ser empregada. Esta afirmação é válida para todos os equipamentos, mas é particularmente importante para sistemas de iluminação.

Com o recente advento das lâmpadas LED, apareceram fabricantes com produtos de características às vezes bastante diversas. Características como vida útil, eficiência luminosa e requisitos de qualidade de energia podem variar muito de uma lâmpada para outra, sendo que os produtos com menor qualidade apresentam características semelhantes a outros de tecnologia menos avançada.

Para assegurar que os ganhos com as ações de eficiência energética sejam maximizados deve-se buscar os produtos mais eficientes disponíveis no mercado. Atualmente, no Brasil, tal comprovação se dá através da certificação de produtos através do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), desenvolvido pelo Instituto

Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Através desta certificação, compulsória para muitos produtos, estes são classificados de acordo com seu nível de eficiência, sendo a categoria “A” a mais eficiente.

Para os equipamentos mais eficientes dentro do PBE existe ainda o selo Procel. Este selo é concedido através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), mantido pela Eletrobras.

Para os estudos realizados nesta dissertação, serão consideradas somente lâmpadas LED com selo Procel. As categorias de lâmpadas LED que podem ser certificadas abrangem praticamente todas as lâmpadas encontradas em residências e possuem as seguintes características mínimas (ELETROBRAS, 2015):

- lâmpada LED com dispositivo de controle integrado à base ou corpo, constituindo uma peça única, não destacável;
- tensão nominal de operação de 127 V e/ou 220 V, com frequência 60 Hz;
- potência nominal até 60 W;
- possuir certificação concedida pelo Inmetro (PBE);
- eficiência energética de no mínimo 80 lm/W (para lâmpadas bulbo);
- fator de potência maior ou igual a 0,92;
- vida nominal declarada pelo fornecedor deve ser de no mínimo 25.000 h com a manutenção de pelo menos 70% do fluxo luminoso inicial.

Foi realizada uma pesquisa de mercado, visando levantar o custo destes equipamentos para aplicação em ações de eficiência energética. Devido ao processo de atualização do selo Procel, grande parte das lâmpadas certificadas não estão disponíveis atualmente no mercado, sendo que foi encontrado somente um dos modelos constantes no selo Procel, o qual apresentou uma variação de um fornecedor para outro (TABELA 11).

TABELA 11 - PESQUISA DE MERCADO DE LÂMPADAS LED – NOV./DEZ. DE 2015

FORNECEDOR	MARCA	TIPO	FLUXO LUMINOSO	POTÊNCIA	VIDA ÚTIL	PREÇO UNITÁRIO
Intral	Aledis	Bulbo	810 lm	9,5 W	25.000 h	R\$ 30,68
Intral	Aledis	Bulbo	810 lm	9,5 W	25.000 h	R\$ 33,90
Intral	Aledis	Bulbo	810 lm	9,5 W	25.000 h	R\$ 35,70

FONTE: O autor (2016)

4.2.3 Tomadas inteligentes

Neste item são explorados os dispositivos inteligentes que permitem o controle automático de equipamentos que utilizam energia elétrica.

Apesar de ainda se tratar de um mercado restrito, é possível encontrar fornecedores de tomadas inteligentes no mercado (TABELA 12). Estes equipamentos variam de preço em função do fabricante e da quantidade de equipamentos disponibilizados em cada kit, sendo que alguns possuem somente uma tomada inteligente e outros possuem mais.

TABELA 12 - PESQUISA DE MERCADO DE TOMADAS INTELIGENTES

PRODUTO	EMPRESA	PAÍS	ENDEREÇO ELETRÔNICO	PREÇO UNITÁRIO
Modlet	ThinkEco	EUA	www.thinkecoinc.com	US\$ 50,00
SafePlug 1200	SafePlug	EUA e Canadá	www.safeplug.com	US\$ 72,00
WEMO	Belkin	EUA	www.wemo.com	US\$ 54,95
ZBMPlug15	Smartenit	Canadá	www.smartnit.com	US\$ 59,99
Z-Wave Plug-In	Leviton	EUA	www.leviton.com	US\$ 59,99

FONTE: Adaptado de Custódio (2013)

Todas as tomadas inteligentes pesquisadas (TABELA 12) não deixam explícito se permitem o controle do modo de espera de equipamentos. Sendo assim, será considerado que as tomadas inteligentes são capazes de ligar e desligar automaticamente os equipamentos que nela estiverem conectados, eliminando assim o consumo em modo de espera (CUSTÓDIO, 2013). Estas tomadas inteligentes também devem ter um baixíssimo consumo energético e permitir que os equipamentos desligados sejam religados manualmente, de forma a não interferir no conforto do usuário final.

A respeito da vida útil das tomadas inteligentes, não há nenhuma menção desta informação pelos fabricantes. Sendo assim, de forma conservadora, será adotada a vida útil de cinco anos para estes equipamentos.

4.2.4 Medidores inteligentes

Os medidores inteligentes são uma parte crucial de um sistema de controle residencial (DI GIORGIO *et al.*, 2011). Através dos dados fornecidos pelos medidores

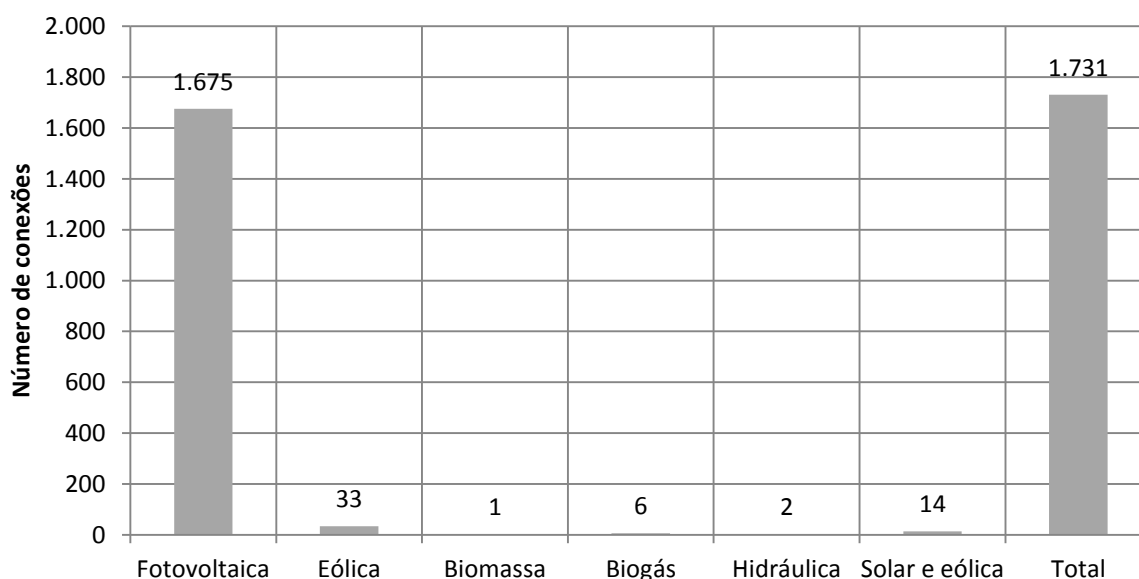
inteligentes aos consumidores, poderão ser tomadas ações de eficiência energética diretamente pelo usuário final.

Neste caso deve-se utilizar o princípio do conservadorismo (EVO, 2012), ou seja, quando a avaliação de uma determinada grandeza for incerta, esta grandeza deve ser avaliada por baixo, resultando em uma postura conservadora. Com base neste princípio, eventuais ganhos energéticos (economia de energia) obtidos com os medidores inteligentes não serão considerados por serem de difícil estimativa, uma vez que não podem ser considerados como economia firme, ou seja, não existem garantias de que o consumidor irá efetivamente economizar energia fazendo uso das informações prestadas pelo medidor inteligente e, mesmo em caso afirmativo, não se pode inferir quanto.

4.2.5 Micro e mini geração distribuída

No Brasil, ao final do ano de 2015, a geração distribuída nos termos da Resolução Normativa ANEEL 482 (micro e mini) alcançou resultados significativos, com um acréscimo de 308% no número de conexões, passando de 424 em 2014 para 1.731 conexões de geração distribuída em 2015 (ANEEL, 2016).

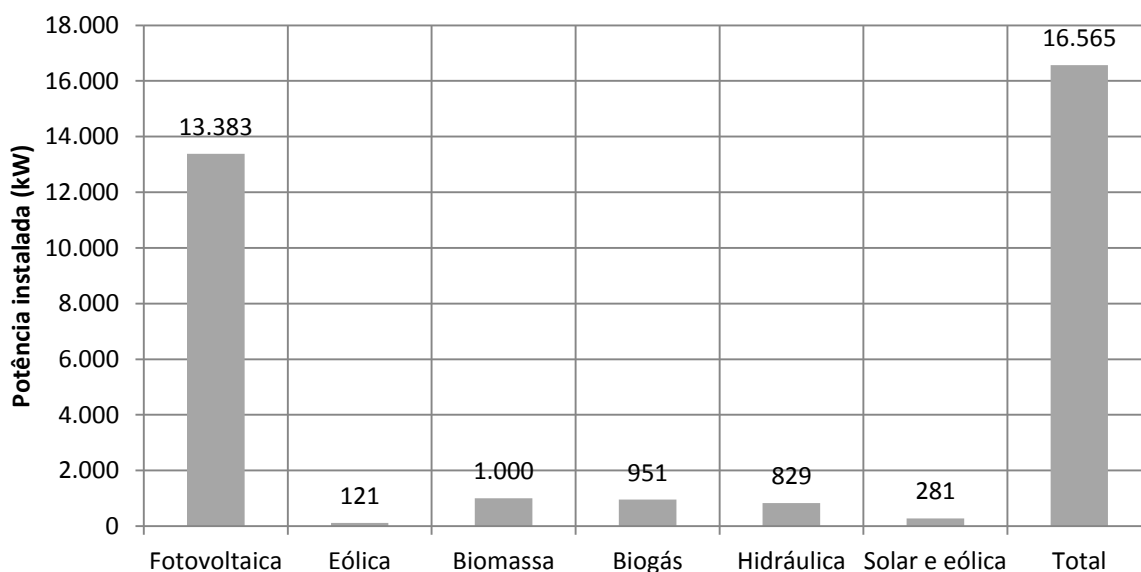
GRÁFICO 4 - NÚMERO DE CONEXÕES DE MICRO E MINI GD NO BRASIL



FONTE: ANEEL (2016)

Devido à facilidade de conexão, ao final de 2015 no Brasil a fonte mais utilizada para micro e mini geração distribuída, em número de conexões, é a fotovoltaica, seguida pela eólica (GRÁFICO 4). Em termos de potência instalada, ainda sobre micro e mini geração distribuída, no final de 2015 no Brasil a fotovoltaica também é a mais expressiva, seguida da biomassa (GRÁFICO 5).

GRÁFICO 5 - POTÊNCIA INSTALADA DE MICRO E MINI GD NO BRASIL



FONTE: ANEEL (2016)

Dessa forma, seguindo a tendência de mercado, a fonte de geração distribuída a ser utilizada nesta dissertação será a fotovoltaica. Os painéis fotovoltaicos geram energia elétrica em corrente contínua, sendo necessária a utilização de equipamentos chamados de inversores de frequência para converter a corrente contínua em corrente alternada.

Conforme estipulado nos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2013a), todos os equipamentos adquiridos com recursos do PEE devem possuir selo Procel e, para os que não possuem, devem ser adquiridos equipamentos com etiqueta Inmetro. Os módulos fotovoltaicos possuem certificação Procel, portanto serão utilizados equipamentos detentores deste selo. No caso dos inversores, os mesmos não possuem certificação Procel, somente do Inmetro, sendo estes, portanto, os equipamentos a serem empregados na simulação. Foi realizada uma pesquisa de mercado mostrada a seguir (TABELA 13):

TABELA 13 - PESQUISA DE MERCADO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

PRODUTO	EMPRESA	VIDA ÚTIL CONSIDERADA	TIPO	PREÇO UNITÁRIO
CS6P-260M	Canadian Solar	20 anos	Material (placa solar)	R\$ 1.400,00
PHB1500-SS	PHB Eletrônica	10 anos	Material (inversor)	R\$ 2.500,00
--	PHB Eletrônica	--	Mão de obra de instalação	R\$ 434,08

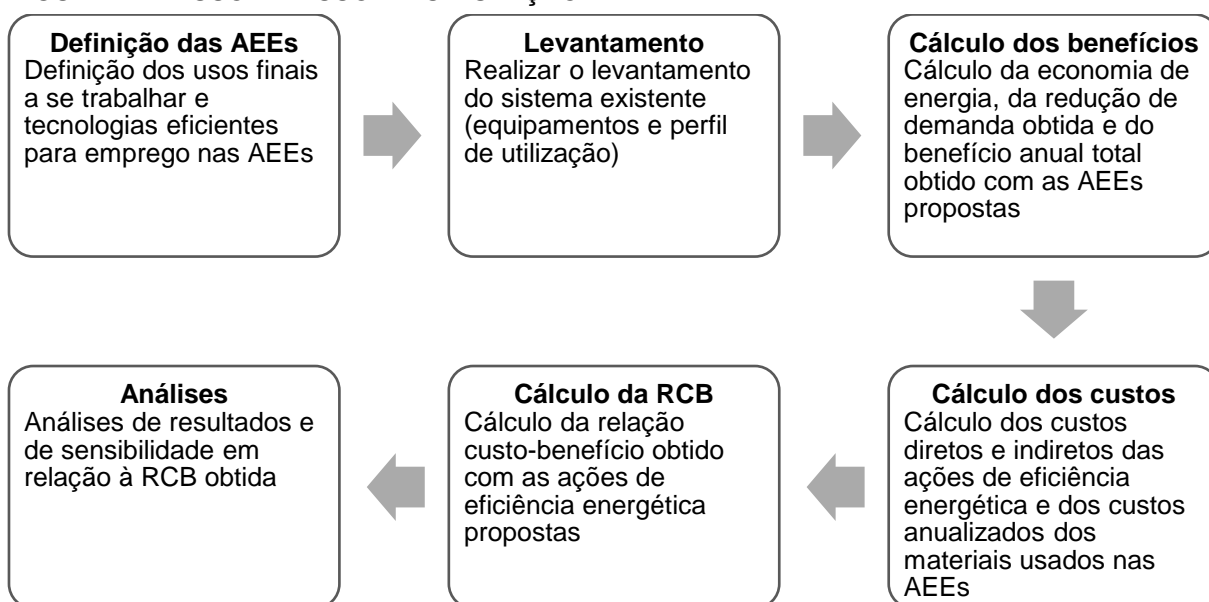
FONTE: O autor (2016)

4.2.6 Simulações

As simulações realizadas neste trabalho têm como foco o Programa de Eficiência Energética, regulado pela ANEEL e executado pelas distribuidoras de energia elétrica. Este foco justifica-se uma vez que se trata do maior fundo disponível no Brasil para realizações de ações de eficiência energética, contando com investimentos de mais de R\$ 450 milhões por ano (ANEEL, 2013a).

Foi elaborada uma metodologia para simulação, representada através de um fluxograma (FIGURA 7), de forma a ilustrar o procedimento que será seguido para as simulações. As etapas que envolvem cálculos (benefícios, custos e relação custo-benefício) possuem fórmulas específicas que serão exploradas individualmente.

FIGURA 7 - PASSO A PASSO DA SIMULAÇÃO



FONTE: O autor (2016)

4.2.6.1 Definição das ações de eficiência energética

O primeiro passo é a definição das ações de eficiência energética que serão realizadas. Ao observar uma determinada instalação, é possível estimar quais usos finais têm potencial de efficientização, mesmo se o observador não for experiente.

Ao observar os equipamentos existentes, devem ser identificados os equipamentos ineficientes, geralmente mais antigos e muitas vezes deteriorados fisicamente. Também é importante identificar os equipamentos que são utilizados com maior intensidade. Desta forma é possível concentrar esforços em encontrar as mais viáveis soluções energéticas disponíveis.

Faz-se aqui uma ressalva, em que se pese o termo relação custo-benefício. Nem sempre a melhor ação de eficiência energética é a energeticamente mais eficiente, uma vez que é possível estar tratando de tecnologia de ponta, custosa e pouco difundida, ou mesmo de um sistema pré-existente já com certo grau de eficiência, tornando mais custosa uma ação de eficiência energética adicional.

Antes de realizar um levantamento criterioso dos equipamentos e condições de funcionamento, é importante entender quais grandezas são mais impactantes em um cálculo de viabilidade. No caso de equipamentos que utilizam energia elétrica, as grandezas mais importantes são a potência elétrica e a forma como os equipamentos utilizam a energia, geralmente representados através de fatores de utilização, dependendo do caso. Também é muito importante observar o perfil de funcionamento do equipamento, especialmente durante o horário de ponta.

Após ter conhecimento de quais grandezas devem ser identificadas em campo, procede-se o levantamento, sempre tomando cuidado em documentar os dados da forma mais clara possível.

4.2.6.2 Cálculo dos benefícios anuais

Na regulação do Programa de Eficiência Energética já está definida grande parte da metodologia de valoração dos benefícios advindos das ações de eficiência energética. No caso sistemas de iluminação, os cálculos serão realizados utilizando a metodologia existente (ANEEL, 2013a).

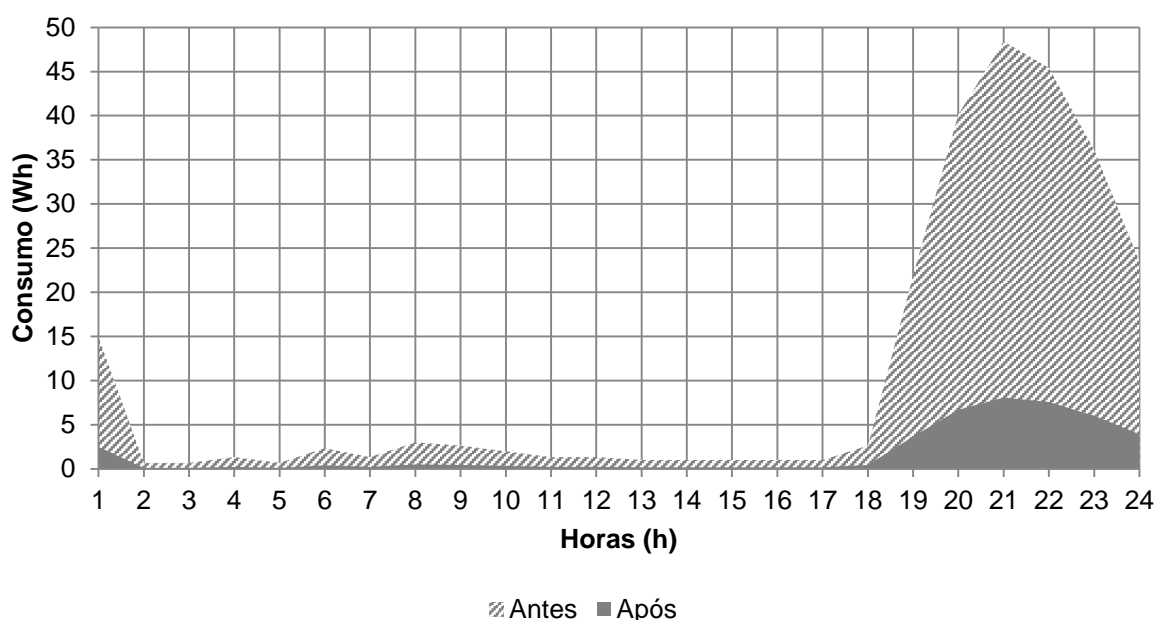
O cálculo da energia economizada (EE) proporcionada pelas ações de eficiência energética em sistemas de iluminação é calculado pela diferença entre o

consumo de m sistemas antes da substituição e do consumo de m sistemas após a substituição. O consumo de cada sistema i antes da substituição é calculado através do produto entre a quantidade de equipamentos (q_{a_i}), a potência de cada equipamento (p_{a_i}) e o horário de funcionamento (h_{a_i}), sendo semelhante para o consumo de cada sistema i após a substituição (q_{p_i} , p_{p_i} e h_{p_i} , respectivamente). Como a energia economizada no PEE é mensurada em MWh/ano e potência de lâmpadas em W, deve-se realizar a conversão de unidades (10^{-6}), conforme (1):

$$EE = \left[\sum_{i=1}^m (q_{a_i} \times p_{a_i} \times h_{a_i}) - \sum_{i=1}^m (q_{p_i} \times p_{p_i} \times h_{p_i}) \right] \times 10^{-6} \quad (1)$$

Para ilustrar o conceito, pode-se utilizar como exemplo a substituição de uma lâmpada incandescente de 60 W por uma lâmpada LED de 10 W. Partindo do perfil médio de utilização de uma lâmpada incandescente por um consumidor residencial (COPEL, 2012), obtém-se a situação ilustrada a seguir (GRÁFICO 6).

GRÁFICO 6 - ENERGIA ECONOMIZADA EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO



FONTE: O autor (2016)

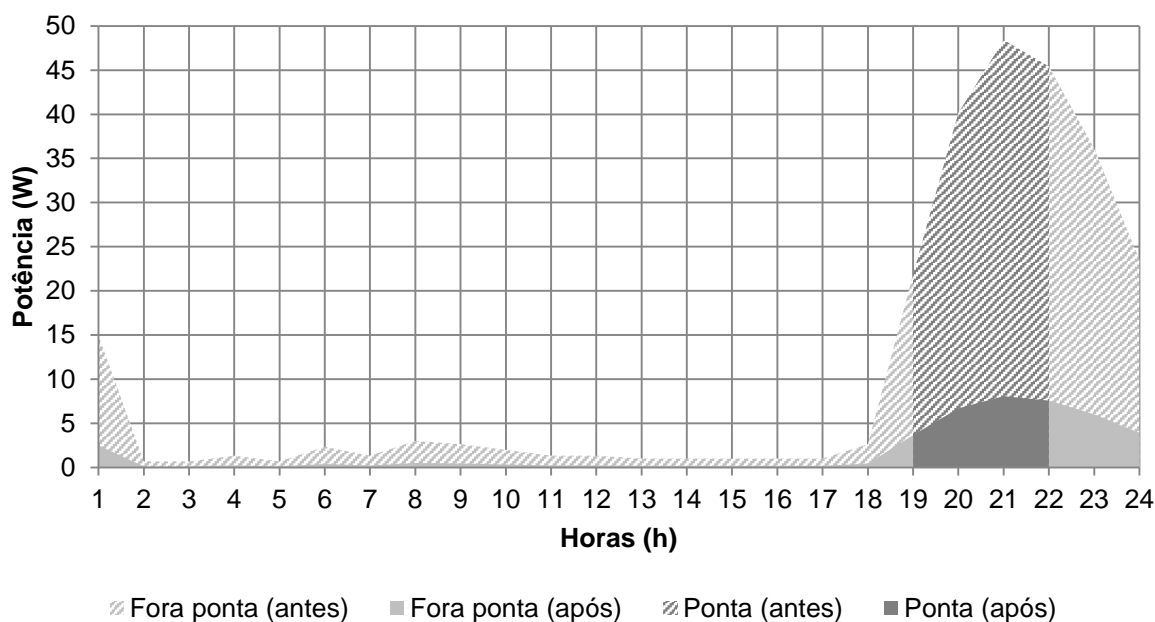
O cálculo da redução de demanda em horário de ponta (RDP) em sistemas de iluminação é calculado pela diferença entre a demanda de m sistemas antes da substituição e da demanda de m sistemas após a substituição. A demanda de cada

sistema i antes da substituição é calculado através do produto entre a quantidade de equipamentos (q_{ai}), a potência de cada equipamento (p_{ai}) e o fator de coincidência em horário de ponta (FCP_{ai}), sendo semelhante para o consumo de cada sistema i após a efficientização (q_{pi} , p_{pi} e FCP_{pi} , respectivamente). Como a redução de demanda em horário de ponta no PEE é mensurada em kW e potência de lâmpadas em W, deve-se realizar a conversão de unidades (10^{-3}), conforme (2).

$$RDP = \left[\sum_{i=1}^m (q_{ai} \times p_{ai} \times FCP_{ai}) - \sum_{i=1}^m (q_{pi} \times p_{pi} \times FCP_{pi}) \right] \times 10^{-3} \quad (2)$$

Com o mesmo exemplo da substituição de uma lâmpada incandescente de 60 W por uma lâmpada LED de 10 W, dentro das mesmas condições colocadas anteriormente (GRÁFICO 6), obtém-se a situação ilustrada a seguir (GRÁFICO 7).

GRÁFICO 7 - REDUÇÃO DE DEMANDA EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO



FONTE: O autor (2016)

O fator de coincidência na ponta de cada sistema i é definido como a razão entre a demanda média em horário de ponta (dp_i) pela demanda instalada do sistema ($q_i \times p_i$), sendo calculado tanto para antes da efficientização (FCP_{ai}) quanto para após (FCP_{pi}), adequando os símbolos dos demais componentes da equação de acordo com a situação (a ou p), conforme (3):

$$FCP_i = \frac{dp_i}{q_i \times p_i} \quad (3)$$

Devido à dificuldade em se obter a demanda média em horário de ponta de cada sistema i (dp_i) sem a realização de medições, ele pode ser estimado inicialmente através do produto entre a potência instalada do equipamento ($q_i \times p_i$), o número de horas de utilização em horário de ponta do sistema i por dia (nup_i), o número de dias úteis em que o sistema é utilizado por mês (nd_i) e o número de meses por ano em que o sistema é utilizado (nm_i). Por fim, é calculada a razão entre o produto supracitado e o valor máximo que ele pode ter, sendo este valor máximo o produto entre 3 h/dia, 22 dias/mês e 12 meses/ano, totalizando 792 (COPEL, 2015), conforme (4):

$$dp_i = q_i \times p_i \times \frac{nup_i \times nd_i \times nm_i}{792} \quad (4)$$

A forma de valoração dos benefícios advindos de ações de eficiência energética em redes elétricas inteligentes é um dos produtos desta dissertação, uma vez que não é prevista na regulação do Programa de Eficiência Energética. Diante deste cenário, propõe-se metodologia de cálculo para estimar os ganhos em termo de energia economizada (EE) e redução de demanda em horário de ponta (RDP).

Partindo da premissa que a economia de energia não é uma grandeza em si, mas a ausência de um consumo de energia, a base para este cálculo é, dentro de um universo de m sistemas, a diferença entre a energia consumida cada sistema i antes (Ea_i) e em cada sistema i após a eficientização (Ep_i). Como as potências de equipamentos residências usualmente são dadas em W faz-se necessária a conversão para MW (10^{-6}), conforme (5):

$$EE = \left(\sum_{i=1}^m Ea_i - \sum_{i=1}^m Ep_i \right) \times 10^{-6} \quad (5)$$

A energia consumida em cada sistema i antes da eficientização (Ea_i) deve levar em consideração, além da quantidade de equipamentos do sistema (qai), da potência do equipamento quando está sendo utilizado (pai) e o seu tempo de utilização efetivo (hai), a potência deste equipamento em modo de espera ($paei$). O tempo de

utilização do equipamento em modo de espera, considerando o tempo total que o equipamento está fisicamente conectado na rede elétrica (h_{fa_i}), representa o restante do dia em que o equipamento não está sendo utilizado ($h_{fa_i} - h_{a_i}$), conforme (6):

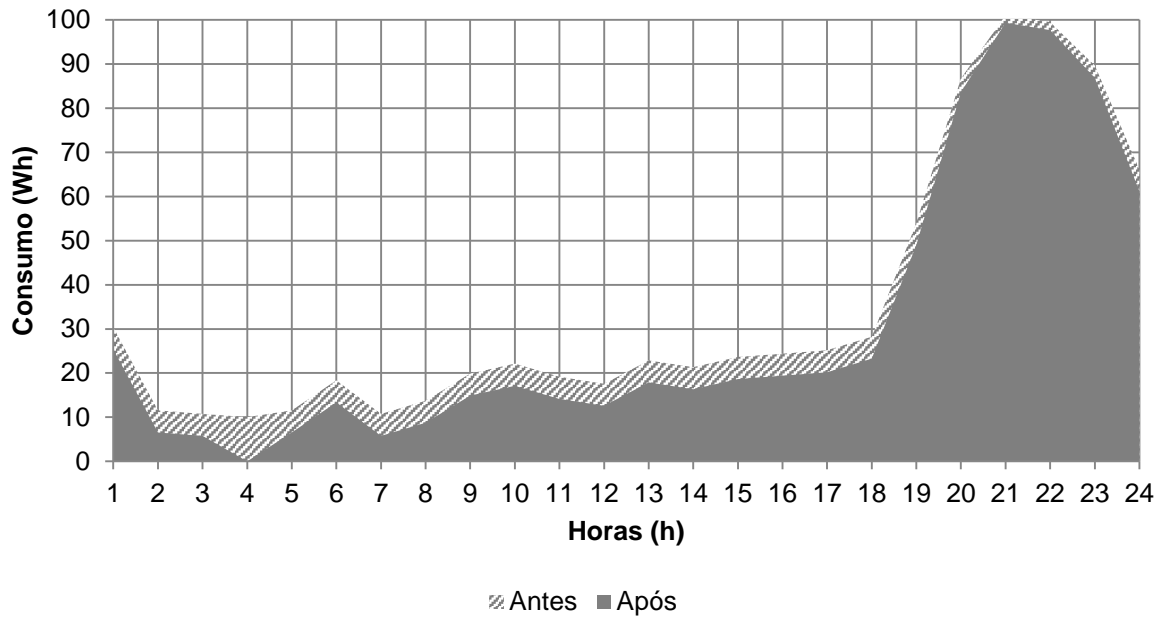
$$E_{a_i} = q_{a_i} \times [p_{a_i} \times h_{a_i} + p_{ae_i} \times (h_{fa_i} - h_{a_i})] \quad (6)$$

A energia consumida em cada sistema i após a efficientização (E_{p_i}) também deve levar em consideração a quantidade de equipamentos (q_{p_i}), o consumo do equipamento quando está sendo utilizado (p_{p_i}) e o tempo de utilização (h_{p_i}) do sistema. Adicionalmente deve-se considerar o consumo dos equipamentos em modo de espera (p_{pe_i}) somente durante o período em que a tomada inteligente não realize o seccionamento do equipamento (h_{pe_i}), o que implicará na redução ou eliminação do consumo em modo de espera, conforme (7):

$$E_{p_i} = q_{p_i} \times (p_{p_i} \times h_{p_i} + p_{pe_i} \times h_{pe_i}) \quad (7)$$

De forma a ilustrar o conceito, será utilizado um exemplo genérico de um televisor hipotético que consome 120 W enquanto ligado e 10 W em modo de espera. Mesmo sem realizar a substituição do televisor por outro mais eficiente, é possível notar a economia de energia com a utilização de tomadas inteligentes (GRÁFICO 8), através da redução do consumo em modo de espera. No caso descrito, partindo de um perfil médio de utilização de televisores (DAIMON, 2011), foi empregado uma configuração de tomada inteligente que permite desconectar o equipamento da rede elétrica após um determinado tempo sem utilização (neste exemplo após 30 minutos). Para fins didáticos, neste caso foi simulado somente o efeito da aplicação de uma tomada inteligente, o que implica somente na modificação no perfil de utilização do equipamento, não interferindo no seu consumo nominal.

GRÁFICO 8 - ENERGIA ECONOMIZADA POR TOMADAS INTELIGENTES



FONTE: O autor (2016)

A redução de demanda em horário de ponta segue o mesmo princípio da economia de energia, sendo definido como, em um universo de m sistemas, a diferença entre a demanda elétrica de cada sistema i antes (Da_i) e de cada sistema i após a eficientização (Dp_i). Como as potências de equipamentos residências usualmente são dadas em W , faz-se necessária a conversão para kW (10^{-3}), conforme (8):

$$RDP = \left(\sum_{i=1}^m Da_i - \sum_{i=1}^m Dp_i \right) \times 10^{-3} \quad (8)$$

A demanda elétrica de cada sistema i antes da eficientização (Da_i) deve ser calculada utilizando, além da quantidade de equipamentos do sistema (qa_i), a demanda elétrica dos equipamentos (pa_i) e o fator de coincidência em horário de ponta ($FCPa_i$), somado à demanda elétrica dos equipamentos em modo de espera (pae_i) e o fator de coincidência em horário de ponta dos equipamentos em modo de espera ($FCPae_i$), conforme (9):

$$Da_i = qa_i \times (pa_i \times FCPa_i + pae_i \times FCPae_i) \quad (9)$$

O cálculo da demanda elétrica de cada sistema i após a efficientização (Dp_i) é análogo ao cálculo da demanda antes da efficientização. Cabe ressaltar que, neste ponto, pode haver uma variação tanto na demanda dos equipamentos, através da substituição do equipamento por outro mais eficiente, quanto uma variação no tempo de funcionamento, através de dispositivos de controle. Ambas situações valem tanto para a demanda nominal do equipamento quanto sua demanda em modo de espera, conforme (10):

$$Dp_i = qp_i \times (pp_i \times FCPp_i + ppe_i \times FCPpe_i) \quad (10)$$

Propõe-se que a determinação do fator de coincidência em horário de ponta para cada sistema i em modo de espera ($FCPe_i$, ou $FCPae_i$ para antes da efficientização e $FCPpe_i$ para após) seja análoga ao fator de coincidência na ponta (FCP_i), sendo calculado através da razão entre a demanda média em horário de ponta em modo de espera (dpe_i) pela demanda instalada do equipamento em modo de espera ($q_i \times pe_i$), adequando os símbolos dos demais componentes da equação de acordo com a situação (a ou p), conforme (11):

$$FCPe_i = \frac{dpe_i}{q_i \times pe_i} \quad (11)$$

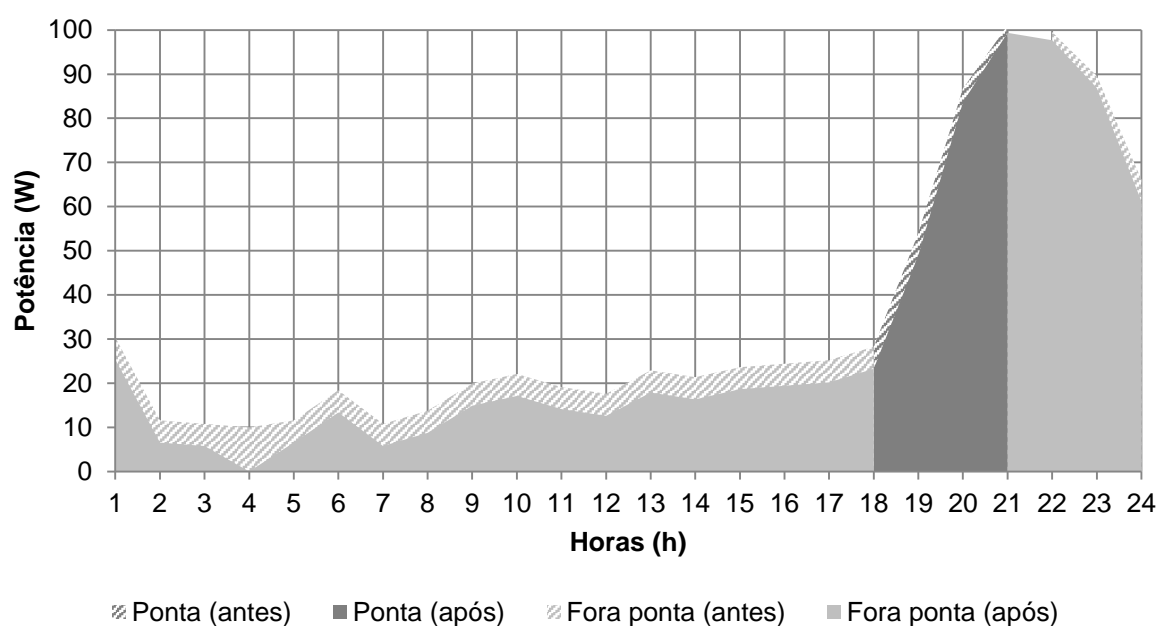
Da forma análoga, propõe-se que demanda média para cada sistema i em horário de ponta em modo de espera (dpe_i) seja calculada de forma semelhante à demanda média em horário de ponta (dp_i), diferindo do número de horas de consumo em modo de espera em horário de ponta do equipamento por dia ($nupe$). Neste caso deve ser levado adicionalmente em consideração o tempo que o equipamento está desligado, porém conectado à rede elétrica ($nupf$), consumindo energia elétrica, conforme (12):

$$dpe_i = q_i \times pe_i \times \frac{(nupf - nup) \times nd \times nm}{792} \quad (12)$$

Utilizando o mesmo exemplo de ação de eficiência energética através de tomadas inteligentes (GRÁFICO 8). Nota-se que a ênfase da redução de potência

concentra-se no horário de ponta do sistema elétrico, compreendido entre 18h00 e 21h00 (GRÁFICO 9). Da mesma forma que no exemplo anterior, para fins didáticos, foi considerado somente o efeito da utilização da tomada inteligente. Isto significa que, na prática, poderia ocorrer, além da variação do perfil de utilização demonstrado, uma variação na potência nominal do equipamento.

GRÁFICO 9 - REDUÇÃO DE DEMANDA POR TOMADAS INTELIGENTES



FONTE: O autor (2016)

A forma de valoração dos benefícios advindos de fontes incentivadas (BA_{CG}) é a mensuração da energia gerada, tanto em horário de ponta (EG_P) quanto em horário fora de ponta (EG_{FP}), e a demanda atendida em horário de ponta (DA_P) através da fonte, considerando o ponto de vista do consumidor, ou seja, utilizando os valores pagos pelo consumidor através da tarifa de energia (ANEEL, 2013a).

A presente dissertação visa a aplicação de fontes incentivadas em unidades consumidoras residenciais (atendidas em baixa tensão), sem contrato de demanda. Sendo assim, a parcela referente à demanda será desconsiderada, restando apenas a parcela de geração de energia. O valor da tarifa de energia para consumidores residenciais é o mesmo para o horário de ponta (T_P) e para o horário fora de ponta (T_{FP}), valendo atualmente (ANEEL, 2015a) com impostos inclusos 780,20 R\$/MWh, conforme (13).

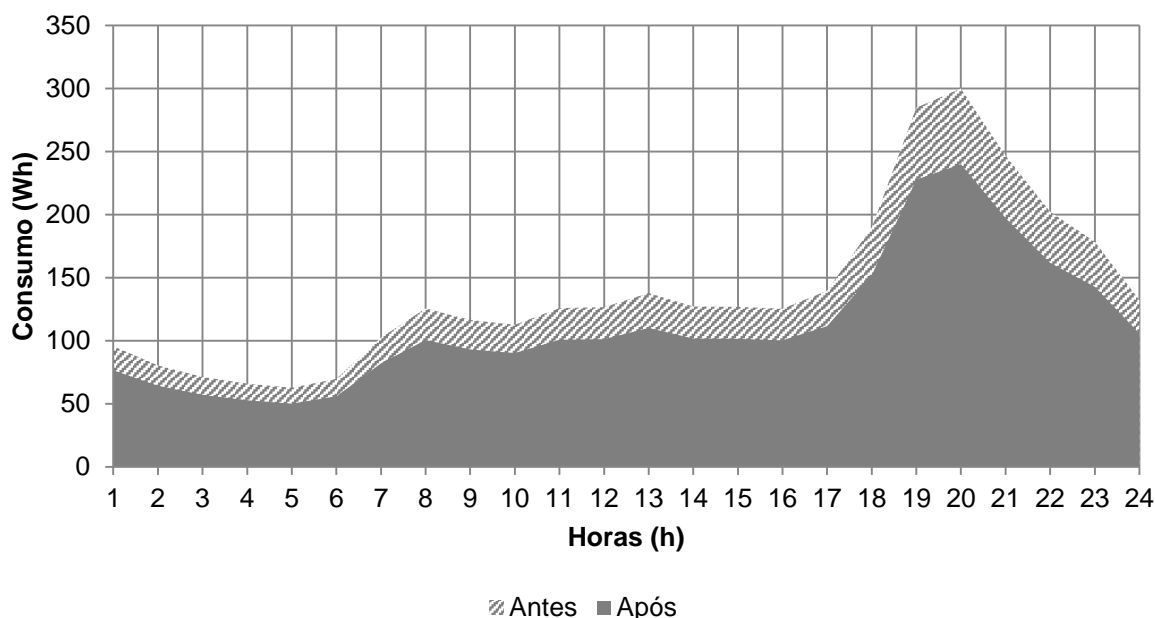
$$BA_{CG} = (EG_P \times T_P) + (EG_{FP} \times T_{FP}) \quad (13)$$

O cálculo do benefício anual total (BA_T) já está previsto na regulação do PEE (ANEEL, 2013a) e caracteriza-se pela soma de dois produtos, sendo o primeiro a energia economizada (EE) pelo custo unitário da energia economizada (CEE) e o segundo a redução de demanda em horário de ponta (RDP) pelo custo unitário evitado de demanda (CED), conforme (14).

$$BA_T = (EE \times CEE) + (RDP \times CED) + BA_{CG} \quad (14)$$

A energia economizada é calculada através da diferença entre a energia consumida no sistema antes da efficientização e após a efficientização, somando o efeito de todos os usos finais efficientizados. De maneira a ilustrar este conceito, tomando como exemplo uma residência modelo (DAIMON, 2011), ao executar ações de eficiência energética (AEEs) que resultassem em uma economia de 20%, a EE é representada pela diferença entre as duas áreas (GRÁFICO 10).

GRÁFICO 10 - CONCEITO DE ENERGIA ECONOMIZADA

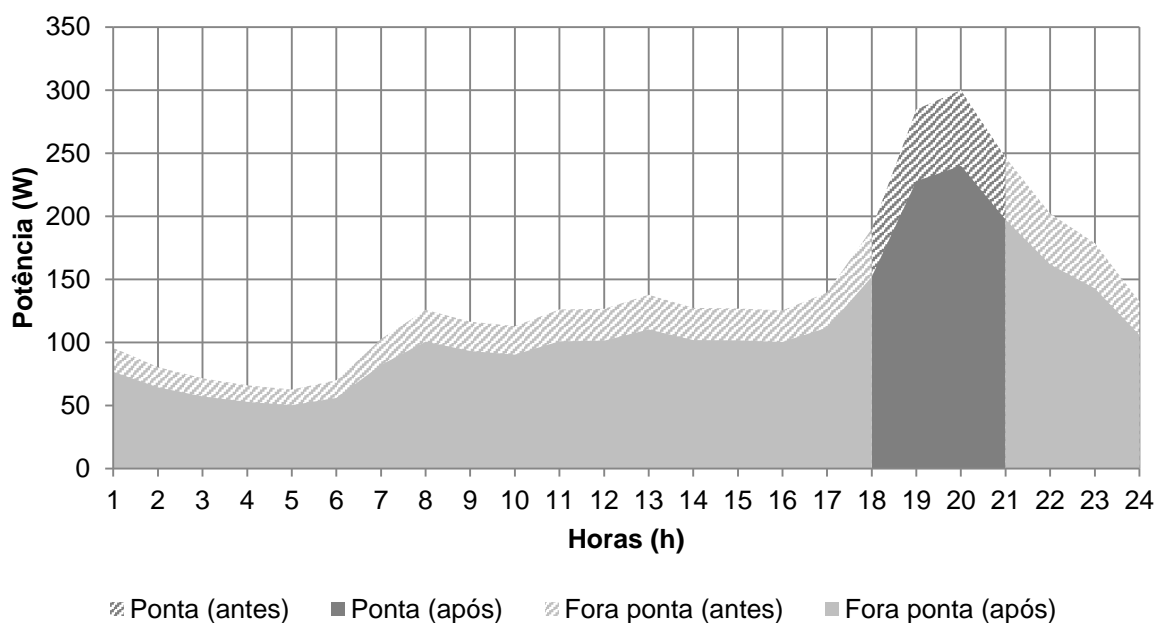


FONTE: O autor (2016)

A demanda retirada em horário de ponta é calculada através da diferença entre a demanda elétrica antes da efficientização e após a efficientização, considerados

somente durante o horário de ponta (das 18h00 às 21h00), somados os efeitos de todos os usos finais envolvidos. Tomando como exemplo a mesma residência modelo, ao executar ações de eficiência energética (AEEs) que resultassem em uma redução de demanda de 20%, a RDP é a diferença entre as duas áreas escuras, sendo que as áreas mais claras (fora de ponta) não são levadas em consideração (GRÁFICO 11).

GRÁFICO 11 - CONCEITO DE REDUÇÃO DE DEMANDA NA PONTA



FONTE: O autor (2016)

O custo unitário da energia economizada (CEE) e o custo unitário evitado de demanda (CED) possuem metodologias específicas de cálculo e são segmentadas por nível de tensão (ANEEL, 2013a). No caso dos consumidores residenciais, os quais são classificados no subgrupo tarifário B1 (residencial), os valores do CEE e do CED para consumidores da Copel foram calculados e disponibilizados por ocasião da Chamada Pública PEE Copel 001/2015, valendo 291,37 R\$/MWh e 758,49 R\$/kW·ano, respectivamente (COPEL, 2015).

4.2.6.3 Cálculo dos custos anualizados

Para o cálculo dos custos anualizados é empregada a metodologia pré-estabelecida pelo órgão regulador (ANEEL, 2013a). O custo anualizado total (CA_T)

caracteriza-se pela soma dos custos anualizados de todos os n materiais (CA_n), conforme (15).

$$CA_T = \sum_n CA_n \quad (15)$$

O custo anualizado de um material n é calculado através do produto entre três parcelas, sendo (i) o custo de um equipamento n (CE_n); (ii) a razão entre o custo total do projeto (CT) pelo custo de todos os equipamentos do projeto (CE_T) e (iii) o fator de recuperação de capital, calculada para uma determinada vida útil u do material n (FRC_u), conforme (16).

$$CA_n = CE_n \times \frac{CT}{CE_T} \times FRC_u \quad (16)$$

O custo de todos os equipamentos do projeto (CE_T) é calculado como a soma de todos os equipamentos utilizados no projeto (CE_n), conforme (17).

$$CE_T = \sum_n CE_n \quad (17)$$

O fator de recuperação de capital (FRC_u) é calculado considerando uma taxa de desconto t , para uma determinada vida útil u de um material n , conforme (18). A taxa de desconto a considerar em um projeto do PEE será a mesma especificada no Plano Nacional de Energia (PNE) vigente na data de submissão do projeto, conforme publicado pela EPE. Atualmente esta taxa de desconto está fixada em 8% ao ano.

$$FRC_u = \frac{t(1+t)^u}{(1+t)^u - 1} \quad (18)$$

4.2.6.4 Cálculo da relação custo-benefício

O principal indicador de viabilidade de um projeto de eficiência energética executado com recursos do PEE é a sua relação custo-benefício (RCB). Ela é calculada através da razão entre os custos anualizados totais (CA_T) e os benefícios

anuais (BA_T) do projeto e está estabelecido na regulação do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2013a), conforme (19).

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T} \quad (19)$$

4.2.6.5 Análises das simulações

Terminada a simulação são realizadas análises sobre os resultados obtidos, podendo ser realizadas sobre qualquer etapa da simulação. Pretende-se estabelecer cenários que viabilizem as ações de eficiência energética propostas nesta dissertação, analisando os diversos cenários envolvidos.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram explorados os materiais utilizados nesta dissertação, consistindo na apresentação das ferramentas pertinentes à eficiência energética em redes elétricas inteligentes. Como ferramenta para decisão de quais equipamentos devem ser priorizados nas ações de eficiência energética, foi apresentada a pesquisa de usos e posses de equipamentos. Também foi apresentado o arcabouço regulatório e o levantamento das tecnologias existentes com potencial de emprego em ações de eficiência energética.

Na seção métodos foram explorados equipamentos para utilização nas ações de eficiência energética pretendidas e as bases das simulações que serão realizadas nesta dissertação, as quais seguirão a metodologia do Programa de Eficiência Energética. Para tanto, foi explorada a metodologia do PEE, a qual visa o cálculo da relação custo-benefício das ações de eficiência energética, através do cálculo de custos anualizados e benefícios anuais. Sobre os benefícios anuais, no PEE (ANEEL, 2013a) é estabelecida uma metodologia padrão para cálculo de sistemas de iluminação e geração distribuída, as quais serão utilizadas nas simulações. Para as tomadas inteligentes, entretanto, foi proposta uma metodologia para cálculo dos benefícios, uma vez não existe na regulamentação do PEE.

5 TESTES E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidas questões relacionadas à realização e análise dos resultados obtidos nas simulações.

5.1 DEFINIÇÃO DO CENÁRIO PARA SIMULAÇÃO

Neste tópico são definidos os cenários de simulação, através da definição das ações de eficiência energética a serem realizadas.

As simulações são realizadas respeitando a regulamentação do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2013a), obedecendo inclusive a premissa de realização de ações de medição e verificação (M&V) de acordo com o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (EVO, 2012). As medições serão simuladas valendo-se da opção A (medição isolada da ação de eficiência energética, através da medição dos parâmetros-chave), utilizando coeficiente de variação (CV) de 0,5 (ANEEL, 2013a), de modo a atingir uma M&V com precisão de $\pm 10\%$ com 95% de confiabilidade, nas seguintes condições:

- iluminação: medição instantânea da potência elétrica ativa das lâmpadas, tanto antes quanto após as substituições, ao custo de R\$50,00 cada medição;
- tomadas inteligentes: como estes equipamentos são, por definição, dotados de micromedidores inteligentes, foi considerada a utilização dos valores medidos de potência elétrica ativa pelas próprias tomadas inteligentes, de modo a não onerar as ações de eficiência energética;
- painéis fotovoltaicos: foi considerada a utilização dos valores medidos de potência elétrica ativa pelo inversor de frequência, de modo a não onerar as ações de eficiência energética.

O descarte de materiais foi previsto para os sistemas de iluminação, uma vez que faz-se necessário o descarte ambientalmente correto dos equipamentos ineficientes substituídos no âmbito do PEE. No caso das tomadas inteligentes e inserção de painéis fotovoltaicos não existe descarte, uma vez que não será simulada a substituição de nenhum equipamento.

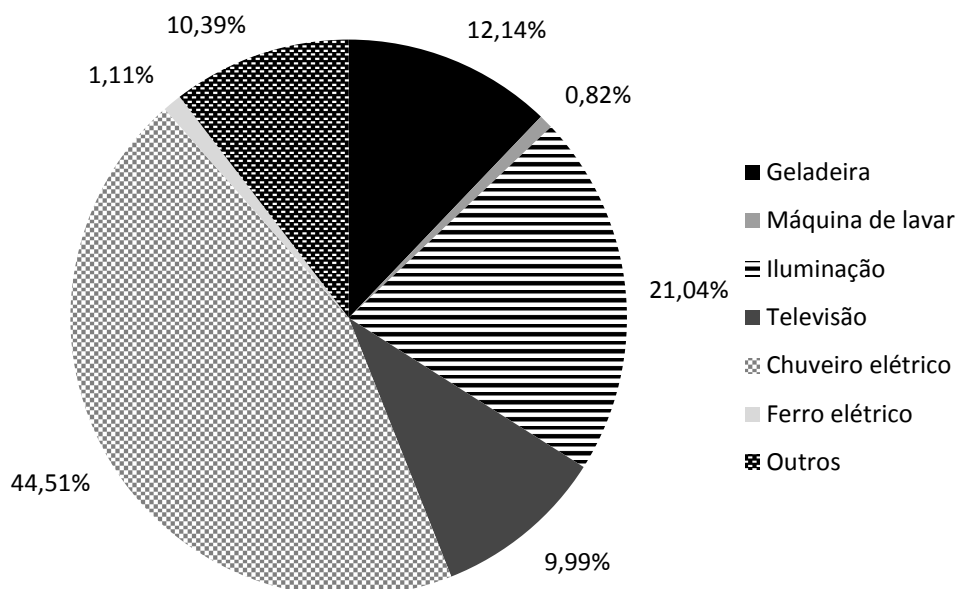
Os projetos no âmbito do PEE são idealizados de forma a considerar aspectos isonômicos, jurídicos e regulatórios, de modo a contemplar a maior parte possível da área de concessão da distribuidora nas AEEs. Nesta simulação foram utilizados custos orçados para a cidade de Curitiba, estado do Paraná, e caso as ações forem aplicadas em outras regiões, é possível haver uma variação dos custos logísticos.

Ressalva-se que os projetos no PEE são concebidos para que um maior número possíveis de consumidores estejam aptos a participarem do projeto, implicando na não segregação de classes, como as simuladas nesta dissertação. As simulações realizadas neste trabalho foram realizadas de forma segregada em classes de consumidores para fins didáticos.

5.1.1 Análise da pesquisa de usos e posses de equipamentos

Analisando o perfil médio de uso da energia elétrica de todos os consumidores residenciais da Copel, o qual é detalhado a seguir (GRÁFICO 12), nota-se uma maior participação no consumo de energia por alguns usos finais.

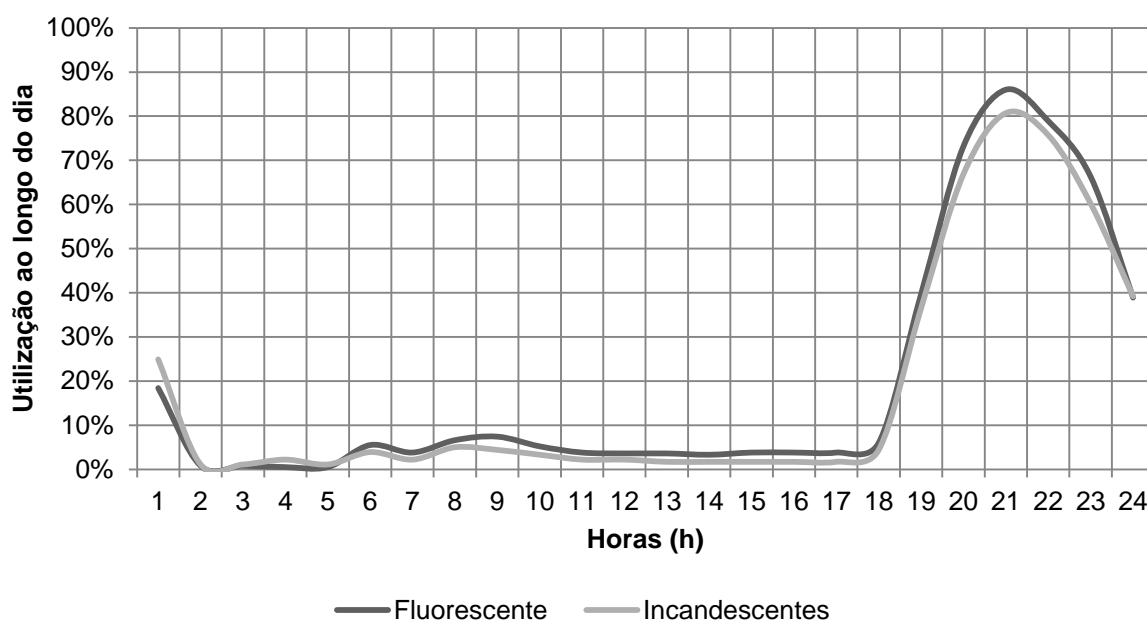
GRÁFICO 12 - PERFIL MÉDIO DO CONSUMO RESIDENCIAL NA COPEL



FONTE: Adaptado de Copel (2012)

Verificando os dados sobre posse de equipamentos (COPEL, 2012), nota-se que lâmpadas fluorescentes são encontradas em maior número que as incandescentes, sendo que os consumidores paranaenses possuem, em média, 7,37 lâmpadas fluorescentes e 4,54 lâmpadas incandescentes por residência. Analisando o perfil de utilização de sistemas de iluminação, nota-se que as lâmpadas são utilizadas geralmente das 18h00 às 1h00, com um perfil de utilização ligeiramente distinto, porém com ambos perfazendo sete horas diárias de uso em média, sendo utilizadas durante todo o horário de ponta. Para a simulação dos sistemas de iluminação será este o perfil considerado (GRÁFICO 13).

GRÁFICO 13 - PERFIL DE UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO



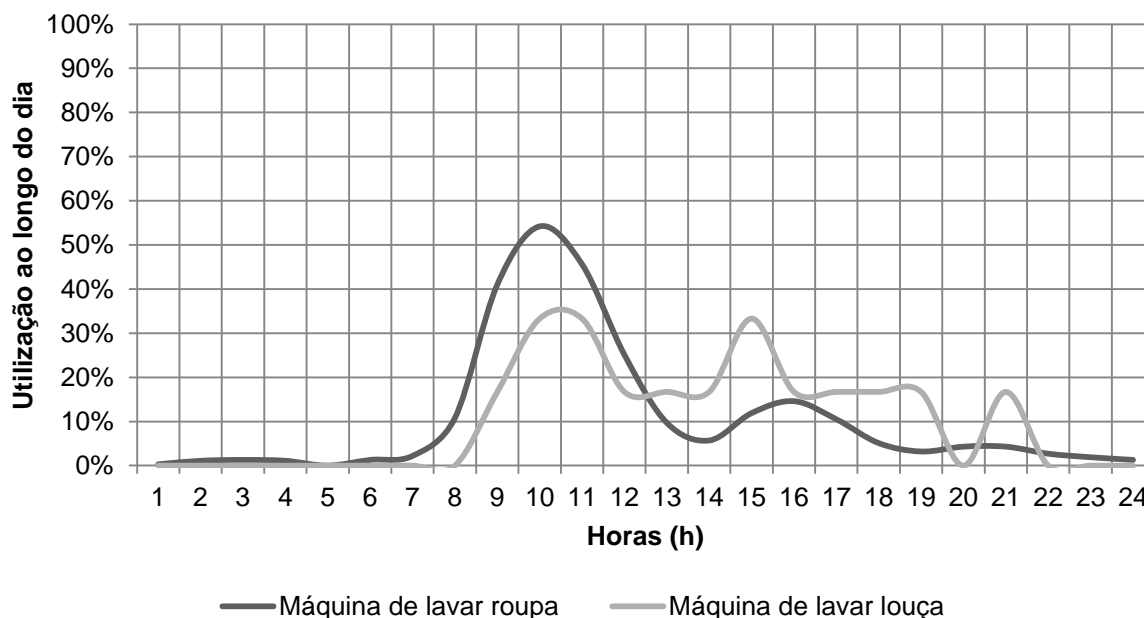
FONTE: Copel (2012)

Os eletrodomésticos podem, de forma simplificada, serem classificados em três grupos: (i) controláveis; (ii) não controláveis e (iii) controláveis termicamente (CUSTÓDIO, 2013). Como exemplo de equipamentos controláveis é possível citar máquina de lavar roupas, de secar e de lavar louças, uma vez que seu funcionamento pode ser modificado com grande liberdade, geralmente sem prejuízo ao conforto do usuário final. Como exemplo de equipamento não controlável, por sua vez, podem-se citar os refrigeradores e congeladores, que devem permanecer conectados permanentemente à rede elétrica. Por fim, um exemplo de equipamento controlável

termicamente é o ar-condicionado, uma vez que este se ajusta de acordo com a temperatura em que estiver ajustado para funcionar.

Na categoria de equipamentos controláveis encontram-se as máquinas de lavar roupa e de lavar louça. Poucas residências possuem mais de uma máquina de lavar roupa (COPEL, 2012), então para efeitos de simulação será considerado um único equipamento por residência. No caso das máquinas de lavar louça, não foram registradas residências com mais de um equipamento e, portanto, na simulação será considerado um por residência. O perfil de funcionamento destes equipamentos é distinto, sendo que o da máquina de lavar roupa é mais comum das 8h00 às 12h00, perfazendo quatro horas diárias de funcionamento, e da máquina de lavar louça é mais comum das 9h00 às 11h00 e das 14h00 às 15h00, perfazendo três horas diárias de funcionamento (GRÁFICO 14). No caso da máquina de lavar louça, existe uma média incidência de uso em horário de ponta, então para efeitos de simulação será considerado como se o equipamento fosse utilizado uma hora durante o período de ponta.

GRÁFICO 14 - USO DE ELETRODOMÉSTICOS CONTROLÁVEIS



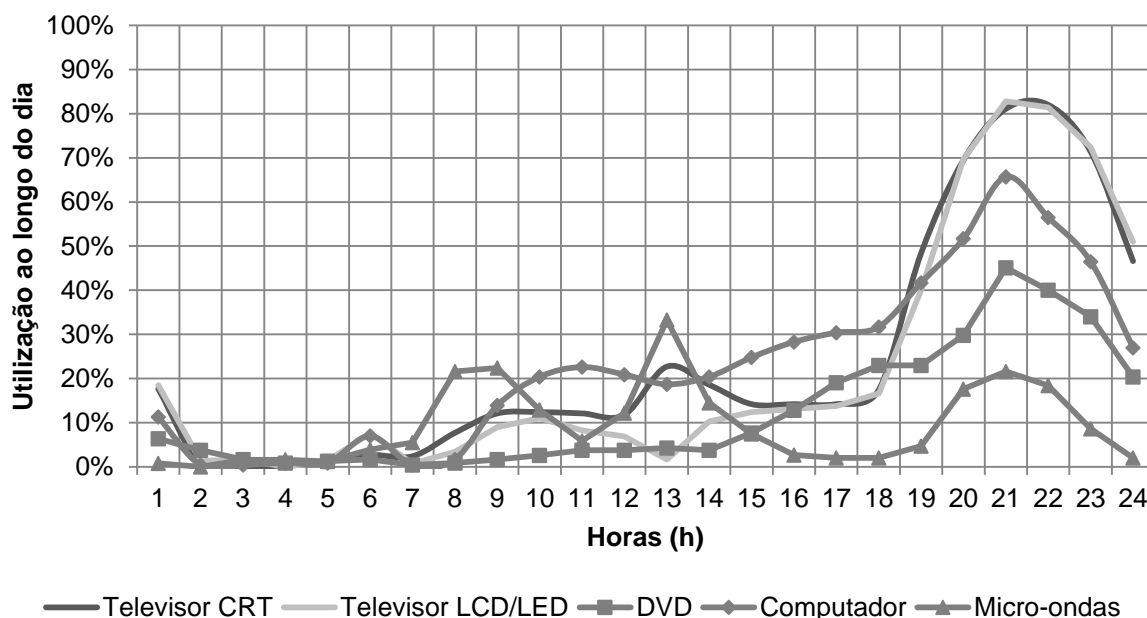
FONTE: Copel (2012)

Equipamentos não controláveis, tais como refrigeradores, congeladores e chuveiros elétricos não farão parte da simulação a ser realizada nesta dissertação. No caso dos refrigeradores e congeladores, vislumbra-se futuramente chegar ao ponto

no qual estes equipamentos serão dotados de inteligência (DI GIORGIO *et al.*, 2011), permitindo assim que os equipamentos regulem seu próprio consumo de acordo com a situação nas quais estão inseridos. Os chuveiros elétricos são cargas que dependem exclusivamente da ação do usuário final, sendo que o que pode ser feito é conscientizar o usuário sobre o horário de utilização. Cabe ressaltar que ações de substituição de refrigeradores ou congeladores antigos por outros mais eficientes, bem como a substituição do chuveiro elétrico convencional por outra tecnologia para aquecimento de água, são realizadas de forma recorrente no Programa de Eficiência Energética, mas como neste momento não se encaixam no conceito de redes inteligentes, não serão consideradas.

Demais equipamentos não controláveis, tais como televisores, computadores, aparelhos de DVD e fornos de micro-ondas são aptos para o emprego de tomadas inteligentes. Mesmo que as tomadas inteligentes não realizem um controle de quando os equipamentos permanecerão ligados, é possível minimizar os efeitos do consumo em modo de espera que todos os equipamentos citados possuem. O perfil de utilização dos equipamentos está demonstrado a seguir (GRÁFICO 15).

GRÁFICO 15 - USO DE ELETRODOMÉSTICOS NÃO CONTROLÁVEIS



FONTE: Copel (2012)

Equipamentos controláveis termicamente se assemelham, para efeitos deste estudo, aos sistemas de refrigeração. É esperado que futuramente estes

equipamentos sejam dotados de inteligência (DI GIORGIO *et al.*, 2011), permitindo assim que os equipamentos regulem seu próprio consumo de acordo com a situação nas quais estão inseridos.

Os dados de consumo de energia elétrica foram retirados de Procel (2016), representando assim valores médios de equipamentos disponíveis no mercado.

5.1.2 Escolha da tecnologia para sistemas de iluminação

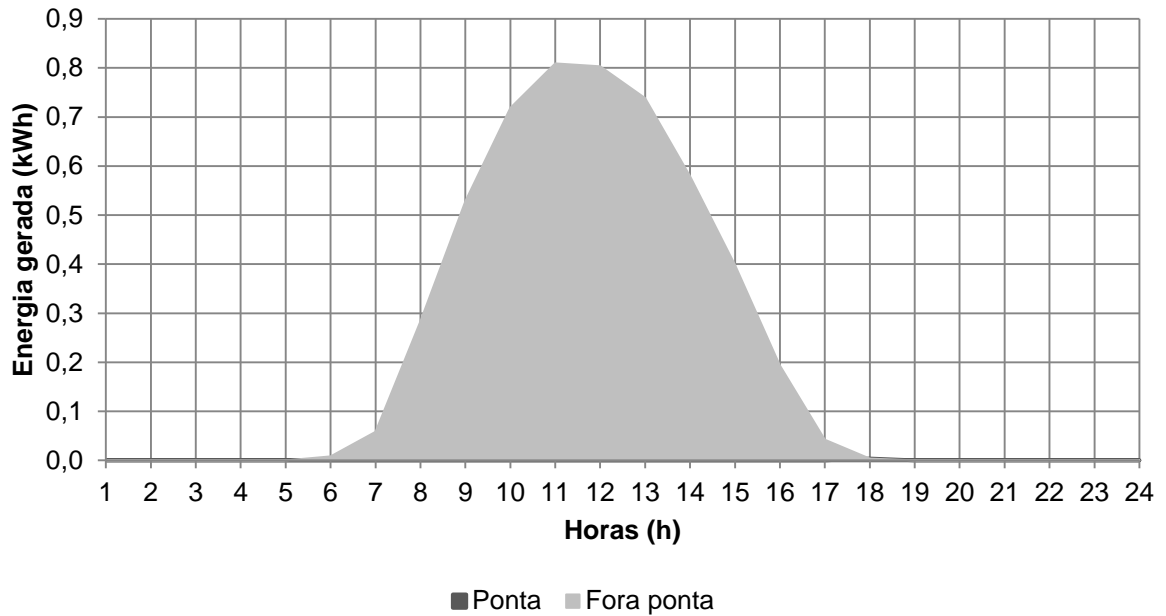
Neste trabalho são realizados estudos contemplando a substituição de lâmpadas existentes por tecnologia LED, uma vez que se trata da tecnologia de iluminação mais eficiente disponível no mercado. Como lâmpadas existentes serão consideradas aquelas constantes na pesquisa de usos e posses de equipamentos, ou seja, lâmpadas fluorescentes e incandescentes.

Como as lâmpadas incandescentes estão sendo sistematicamente proibidas de serem comercializadas em território nacional, para efeitos de simulações serão consideradas em seu lugar as lâmpadas halógenas que, com a saída das incandescentes, se tornam as mais baratas disponíveis no mercado. Considera-se esta substituição uma vez que, através de ações de eficiência energética, está se impedindo que equipamentos ineficientes sejam utilizados por serem mais baratos.

5.1.3 Perfil de geração dos painéis solares

Através do programa Paraná Smart Grid (COPEL, 2016), foi instalado em Curitiba (PR) uma planta piloto de geração fotovoltaica de 1,4 kWp de potência máxima, através de seis placas de geração solar. Esta planta foi instalada em condições ideais, virada para o norte e com a angulação correta. Foi levantado o perfil de geração de energia desta planta, o qual está representado diariamente (GRÁFICO 16).

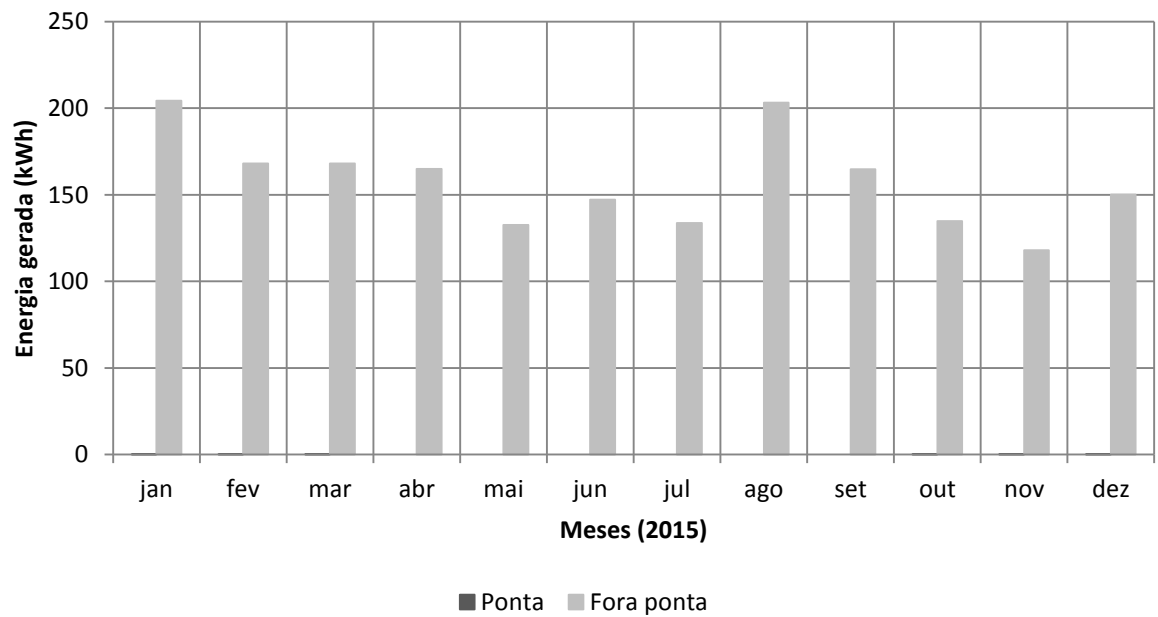
GRÁFICO 16 - PERFIL DIÁRIO DE GERAÇÃO SOLAR



FONTE: Copel (2016)

De forma análoga, foi levantado o perfil mensal de geração da planta de geração fotovoltaica (GRÁFICO 17).

GRÁFICO 17 - PERFIL ANUAL DE GERAÇÃO SOLAR



FONTE: Copel (2016)

Nota-se que a placa solar gera energia somente em horário fora de ponta (GRÁFICO 16), sendo que a geração em horário de ponta é mínima, quase inexpressiva (18h00 às 21h00). Também é interessante analisar a planta solar de um ponto de vista anual, uma vez que a geração depende fortemente das condições meteorológicas, variando de forma padrão mês a mês, sendo que alguns meses são mais favoráveis do que outros para a geração solar (GRÁFICO 17).


Para as simulações será utilizada a energia efetivamente gerada pelo sistema piloto instalado no Paraná Smart Grid, uma vez que este é um dado confiável e efetivamente medido. Esta energia gerada será ajustada proporcionalmente para um sistema de 1,3 kWp de potência máxima, uma vez que no mercado foram obtidos custos de implantação para um sistema de 1,3 kWp.

5.2 SIMULAÇÃO BASEADA NA PESQUISA DE USOS E POSSES

Para realização das simulações foi utilizada como base uma planilha disponibilizada pela Copel (2015), por ocasião da Chamada Pública PEE Copel 001/2015, sendo necessário seu aperfeiçoamento para aplicação nesta dissertação. Para ilustrar os conceitos, foram inseridos nesta dissertação imagens dessa planilha preenchida. Esta planilha contempla a metodologia básica estipulada pela ANEEL, sendo necessária a criação de abas para o cálculo dos ganhos energéticos com tomadas inteligentes e com geração distribuída. Sendo assim, inicia-se a simulação informando os dados da unidade consumidora (FIGURA 8).

FIGURA 8 - DEFINIÇÃO DA UNIDADE CONSUMIDORA PARA SIMULAÇÃO

PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
Concessionária	Copel Distribuição S.A.
Tipologia do projeto	Residencial
	CNPJ 04.368.898/0001-06
IDENTIFICAÇÃO DA UNIDADE CONSUMIDORA BENEFICIADA	
Localização	Curitiba - LES
Atividade	Sem fins lucrativos
Tipo de empresa	Demais empresas
Modalidade tarifária	Tarifa convencional
Subgrupo tarifário	B1 - Baixa tensão (residencial)





FONTE: Adaptado de Copel (2015)

O número de equipamentos e o perfil de uso dos mesmos foram retirados da pesquisa de usos e posses de equipamentos (COPEL, 2012). Dentro da pesquisa foram definidos diversos perfis de consumo e, para cada perfil, existem eletrodomésticos que são mais recorrentes para um determinado perfil. Dependendo do tipo de equipamentos encontrados, um determinado consumidor pode ter maior ou menor elasticidade, ou seja, dependendo do tipo de equipamento encontrado um determinado consumidor pode possuir maior facilidade de controlar seu consumo do que outro. Para efeitos de simulação será considerado um consumidor dentro das características médias encontradas na pesquisa de usos e posses e que possui equipamentos possíveis de serem controlados.

5.2.1 Cálculo dos benefícios anuais

O cálculo dos benefícios foi calculado separadamente por uso final de energia elétrica, conforme estipulado pelo órgão regulador (ANEEL, 2013a), levando em consideração o cenário de uma residência padrão de um consumidor da Copel.

Na simulação realizada nesta dissertação, iniciou-se pelo uso final iluminação (FIGURA 9). Ressalta-se que a metodologia aqui empregada é aquela estabelecida na regulamentação do Programa de Eficiência Energética, sendo que nas planilhas de cálculo de benefícios existem referências numéricas auxiliares (primeira coluna), as quais consistem em referências às grandezas necessárias para elaboração de um projeto de eficiência energética no âmbito do PEE.

FIGURA 9 - SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DO USO FINAL ILUMINAÇÃO

ILUMINAÇÃO - SISTEMA ATUAL				TOTAL	ilumin 1	ilumin 2
1	Tipo de equipamento / tecnologia				Halógena	Fluorescente
	Quantidade de luminárias			11	4	7
2	Lâmpadas	Potência	W pla_i		50,00	15,00
3		Quantidade	qla_i	11	4	7
4	Potência instalada	kW	Pa_i	0,31	0,20	0,11
	Tempo de utilização do equipamento, em um dia	h/dia			7,00	7,00
5	Dias de utilização do equipamento, em um ano	dia/ano			365,00	365,00
	Funcionamento	h/ano	ha_i		2.555,00	2.555,00
	Horas de utilização em horário de ponta, em um dia	h/dia	$nupa_i$		3,00	3,00
	Dias úteis de utilização em horário de ponta, em um mês	dia/mês	nda_i		22,00	22,00
6	Meses de utilização em horário de ponta, em um ano	mês/ano	nma_i		12,00	12,00
	Potência média na ponta	kW	dpa_i	0,31	0,20	0,11
	Fator de coincidência na ponta		$FCPa_i$		1,00	1,00
7	Energia consumida	MWh/ano	Ea_i	0,78	0,51	0,27
8	Demanda média na ponta	kW	Da_i	0,31	0,20	0,11

ILUMINAÇÃO - SISTEMA PROPOSTO				TOTAL	ilumin 1	ilumin 2
11	Tipo de equipamento / tecnologia				LED	LED
	Quantidade de luminárias			11	4	7
12	Lâmpadas	Potência	W	plp_i	9,50	9,50
13		Quantidade		qlp_i	4	7
14	Potência instalada			kW	Pp_i	0,10
	Tempo de utilização do equipamento, em um dia			h/dia	7,00	7,00
15	Dias de utilização do equipamento, em um ano			dia/ano	365,00	365,00
	Funcionamento			h/ano	hp_i	2.555,00
	Horas de utilização em horário de ponta, em um dia			h/dia	$nupp_i$	3,00
	Dias úteis de utilização em horário de ponta, em um mês			dia/mês	ndp_i	22,00
16	Meses de utilização em horário de ponta, em um ano			mês/ano	nmp_i	12,00
	Potência média na ponta			kW	dpp_i	0,10
	Fator de coincidência na ponta				$FCPP_i$	1,00
17	Energia consumida			MWh/ano	Ep_i	0,27
18	Demanda média na ponta			kW	Dp_i	0,10

ILUMINAÇÃO - RESULTADOS ESPERADOS				TOTAL	ilumin 1	ilumin 2
21	Redução de demanda na ponta			kW	RDP_i	0,20
22	Custo evitado de demanda (CED) = 758,49			%	$RDP_i\%$	65,74%
23	Energia economizada			MWh/ano	EE_i	0,51
24	Custo da energia evitada (CEE) = 291,37			%	$EE_i\%$	65,74%
Benefício anualizado iluminação				R\$	B_{ILUM}	301,34

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

Para o cálculo dos benefícios advindos do emprego de tomadas inteligentes, foi utilizada a metodologia definida nesta dissertação (FIGURA 10). O consumo dos equipamentos foi obtido através de dados disponibilizados pelo Procel (2016) e representam valores médios de equipamentos disponíveis no mercado.

FIGURA 10 - SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DE TOMADAS INTELIGENTES

OUTROS USOS FINAIS - SISTEMA ATUAL				TOTAL	outros 1	outros 2	outros 3	outros 4	outros 5	outros 6	outros 7
1	Tipo de equipamento / tecnologia				Computador	TV CRT 29"	TV LED 42"	DVD	Micro-ondas	Lava roupa	Lava louças
2	Quantidade			qa_i	8	1	1	2	1	1	1
3	Potência nominal do equipamento			W	pa_i	120,00	85,00	100,00	15,00	1.400,00	800,00
	Potência nominal do equipamento em modo de espera			W	pae_i	3,00	2,78	0,20	5,00	5,00	0,00
4	Potência instalada			kW	Pa_i	4,12	0,12	0,09	0,20	0,02	1,40
	Tempo de utilização do equipamento, em um dia			h/dia		7,00	7,00	7,00	2,00	1,00	4,00
5	Dias de utilização do equipamento, em um ano			dia/ano		365,00	365,00	365,00	52,00	365,00	104,00
	Funcionamento			h/ano	ha_i	2.555,00	2.555,00	2.555,00	104,00	365,00	416,00
	Tempo que o equipamento fica conectado à rede elétrica			h/dia		24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
5a	Dias que o equipamento fica conectado à rede elétrica			dia/ano		365,00	365,00	365,00	365,00	365,00	365,00
	Permanência do equipamento conectado à rede elétrica			h/ano	hfa_i	8.760,00	8.760,00	8.760,00	8.760,00	8.760,00	8.760,00
	Horas de utilização em horário de ponta, em um dia			h/dia	$nupa_i$	3,00	2,00	2,00	2,00	0,50	0,00
	Dias úteis de utilização em horário de ponta, em um mês			dia/mês	nda_i	22,00	22,00	22,00	4,00	22,00	8,00
6	Meses de utilização em horário de ponta, em um ano			mês/ano	nma_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	Potência média na ponta			W	dpa_i	636,06	120,00	56,67	133,33	1,82	233,33
	Fator de coincidência na ponta				$FCPa_i$	1,00	0,67	0,67	0,12	0,17	0,00
	Permanência do equipamento conectado na ponta			h/dia	$nupfa_i$	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
6a	Potência média em modo de espera na ponta			W	$depa_i$	5,53	0,00	0,93	0,13	0,30	4,17
	Fator de coincidência na ponta em modo de espera				$FCPea_i$	0,00	0,33	0,33	0,06	0,83	0,00
7	Energia consumida			MWh/ano	Ea_i	2,24	0,33	0,23	0,51	0,04	0,55
8	Demanda média na ponta			kW	Da_i	0,64	0,12	0,06	0,13	0,00	0,24

OUTROS USOS FINAIS - SISTEMA PROPOSTO				TOTAL	outros 1	outros 2	outros 3	outros 4	outros 5	outros 6	outros 7
11	Tipo de equipamento / tecnologia			Computador	TV CRT 29"	TV LED 42"	DVD	Micro-ondas	Lava roupa	Lava louças	
12	Quantidade	qp	8	1	1	2	1	1	1	1	1
13	Potência nominal do equipamento	W	pp	120,00	85,00	100,00	15,00	1.400,00	800,00	1.500,00	
	Potência nominal do equipamento em modo de espera	W	ppe	3,00	2,78	0,20	5,00	5,00	0,00	0,00	
14	Potência instalada	kW	Pp	4,12	0,12	0,09	0,20	0,02	1,40	0,80	1,50
	Tempo de utilização do equipamento, em um dia	h/dia		7,00	7,00	7,00	2,00	1,00	4,00	3,00	
15	Dias de utilização do equipamento, em um ano	dia/ano		365,00	365,00	365,00	52,00	365,00	104,00	52,00	
	Funcionamento	h/ano	hp	2.555,00	2.555,00	2.555,00	104,00	365,00	416,00	156,00	
	Tempo de utilização do equipamento em modo de espera	h/dia		1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	20,00	21,00	
15a	Dias de utilização do equipamento em modo de espera	dia/ano		365,00	365,00	365,00	52,00	365,00	104,00	52,00	
	Funcionamento do equipamento em modo de espera	h/ano	hpe	365,00	365,00	365,00	52,00	730,00	2.080,00	1.092,00	
	Horas de utilização em horário de ponta, em um dia	h/dia	nupp	3,00	2,00	2,00	2,00	0,50	0,00	0,00	
	Dias úteis de utilização em horário de ponta, em um mês	dia/mês	ndp	22,00	22,00	22,00	4,00	22,00	8,00	4,00	
16	Meses de utilização em horário de ponta, em um ano	mês/ano	nmp	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	
	Potência média na ponta	W	dpp	545,15	120,00	56,67	133,33	1,82	233,33	0,00	0,00
	Fator de coincidência na ponta		FCPP		1,00	0,67	0,67	0,12	0,17	0,00	0,00
	Permanência do equipamento conectado na ponta	h/dia	nupfp		3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
16a	Potência média na ponta	W	dpp	5,53	0,00	0,93	0,13	0,30	4,17	0,00	0,00
	Fator de coincidência na ponta		FCPP		0,00	0,33	0,33	0,06	0,83	0,00	0,00
17	Energia consumida	MWh/ano	Ep	2,12	0,31	0,22	0,51	0,00	0,51	0,33	0,23
18	Demanda média na ponta	kW	Dp	0,55	0,12	0,06	0,13	0,00	0,24	0,00	0,00

OUTROS USOS FINAIS - RESULTADOS ESPERADOS				TOTAL	outros 1	outros 2	outros 3	outros 4	outros 5	outros 6	outros 7		
21	Redução de demanda na ponta	kW	RDP	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09		
22	Custo evitado de demanda (CED) =	R\$		758,49	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%		
23	Energia economizada	MWh/ano	EE	0,12	0,02	0,02	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00		
24	Custo da energia evitada (CEE) =	R\$		291,37	5,39%	6,93%	0,45%	95,94%	6,93%	0,00%	0,00%		
Benefício anualizado outros usos finais				R\$	B _{OUTROS}	103,16	5,10	4,73	0,67	12,53	11,17	0,00	68,95

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

No caso da máquina de lavar roupa, de acordo com o perfil de utilização do mesmo (GRÁFICO 14), seu uso foi representado com o uso em 1 hora na ponta e 4 dias úteis por mês, representando o uso do equipamento uma vez por semana.

Para o cálculo dos benefícios da aplicação de geração distribuída, através do perfil de geração do Paraná Smart Grid, foram simulados os benefícios para um kit de geração solar comercialmente disponível de 1,3 kWp (FIGURA 11).

FIGURA 11 - SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

FONTES INCENTIVADAS - SISTEMA PROPOSTO				TOTAL	fi 1
1	Tipo de equipamento / tecnologia				Geração solar
2	Potência nominal da central geradora	Wp	pp _i	260,00	260,00
3	Quantidade de centrais geradores		qp _i	5	5
4	Potência instalada de geração	kWp	Pp _i	1,30	1,30
5	Potência nominal de cada inversor	W	pi _i	1.500,00	1.500,00
6	Quantidade de inversores		qi _i	1	1
7	Potência instalada de inversores	kW	Pi _i	1,50	1,50

FONTES INCENTIVADAS - RESULTADOS ESPERADOS				TOTAL	fi 1
11	Energia gerada na ponta	MWh/ano	EG _{pi}	0,00	0,001
	Tarifa de energia na ponta (R\$/MWh)	R\$		0,43	0,43
12	Energia gerada fora da ponta	MWh/ano	EG _{FPI}	1,62	1,620
	Tarifa de energia fora de ponta (R\$/MWh)	R\$		1.263,96	1.263,96
13	Energia gerada	MWh/ano	EG _i	1,62	1,62
Benefício anualizado fontes incentivadas				R\$	B _{FI}
				1.264,39	1.264,39

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

5.2.2 Cálculo dos custos anualizados

O cálculo dos custos foi realizado por uso final, calculado separadamente conforme estipulado pelo órgão regulador (ANEEL, 2013a), levando em consideração o cenário de uma residência padrão de um consumidor da Copel.

Em se tratando de um projeto no âmbito do Programa de Eficiência Energética, este deve ser obrigatoriamente realizado com intermédio de uma concessionária de energia. Os custos relacionados à gestão da distribuidora são definidos pela própria empresa e são calculados automaticamente pela planilha disponibilizada (COPEL, 2015).

Na simulação realizada nesta dissertação, iniciou-se pelos custos referentes às ações no sistema de iluminação (FIGURA 12). A metodologia aqui empregada é aquela estabelecida no PEE. Para os cálculos deve ser considerada uma vida útil anual, mas a vida útil das lâmpadas é expressa em horas de utilização pelos fabricantes. Para a conversão, deve ser considerada a equação (20):

$$\text{Vida útil (ano)} = \frac{\text{Vida útil (horas)}}{\text{Tempo de utilização (horas/ano)}} \quad (20)$$

Existem também outros custos indiretos, tais como descarte de materiais substituídos e ações de medição e verificação de resultados, os quais foram baseados através de uma média de mercado.

FIGURA 12 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS PARA O USO FINAL ILUMINAÇÃO

ILUMINAÇÃO								
CUSTOS DIRETOS								
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS				ORIGEM DOS RECURSOS				
Materiais e equipamentos	Vida útil (anos)	Quantidade	Valor unitário	PEE	Terceiros	Consumidor	Total	
1 Lâmpada LED 9,5W com selo Procel	9,78	4	R\$ 30,68	R\$ 122,72		R\$ -	R\$ 122,72	
2 Lâmpada LED 9,5W com selo Procel	9,78	7	R\$ 30,68	R\$ 214,76		R\$ -	R\$ 214,76	
Materiais e equipamentos				R\$ 337,48	R\$ -	R\$ -	R\$ 337,48	
Mão de obra própria				R\$ 2.998,65	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.998,65	
Mão de obra de terceiros				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Transporte				R\$ 333,33	R\$ -	R\$ -	R\$ 333,33	
Sub total - Custos diretos				R\$ 3.669,46	R\$ -	R\$ -	R\$ 3.669,46	
CUSTOS INDIRETOS								
CUSTOS INDIRETOS				ORIGEM DOS RECURSOS				
Administração própria				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Marketing				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Treinamento e capacitação				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Descarte de materiais			Quantidade	Valor unitário	PEE	Terceiros	Consumidor	Total
1 Lâmpada halógena		4	R\$ 1,00	R\$ 4,00			R\$ 4,00	
2 Lâmpada fluorescente compacta		7	R\$ 1,50	R\$ 10,50			R\$ 10,50	
Descarte de materiais				R\$ 14,50	R\$ -	R\$ -	R\$ 14,50	
Medição e verificação				R\$ 1.050,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.050,00	
Outros custos indiretos				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Sub total - Custos indiretos				R\$ 1.064,50	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.064,50	
Custos iluminação				R\$ 4.733,96	R\$ -	R\$ -	R\$ 4.733,96	

ILUMINAÇÃO					
CUSTOS ANUALIZADOS					
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS			ORIGEM DOS RECURSOS		
Materiais e equipamentos	Vida útil (anos)	FRC	CA _{PEE}	CA _{TOTAL}	
1 Lâmpada LED 9,5W com selo Procel	9,78	0,15121	R\$ 37,21	R\$ 37,21	
2 Lâmpada LED 9,5W com selo Procel	9,78	0,15121	R\$ 65,11	R\$ 65,11	
Custo anualizado total iluminação			CA _{TILUM}	R\$ 102,31	R\$ 102,31

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

Para as tomadas inteligentes, como os materiais foram cotados em dólar, foi utilizado um valor médio aproximado do câmbio de R\$ 4,00 para a conversão. No caso das ações de medição e verificação, obrigatórias para os projetos no âmbito do Programa de Eficiência Energética, as tomadas inteligentes são equipamentos dotados de medidores e, portanto, é esperado utilizar estes dados diretamente de forma a desonerar o projeto de eficiência energética (FIGURA 13).

FIGURA 13 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS DE TOMADAS INTELIGENTES

OUTROS USOS FINAIS							
CUSTOS DIRETOS							
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS				ORIGEM DOS RECURSOS			
Materiais e equipamentos	Vida útil (anos)	Quantidade	Valor unitário	PEE	Terceiros	Consumidor	Total
1 Tomada inteligente	5,00	8	R\$ 200,00	R\$ 1.600,00			R\$ 1.600,00
Materiais e equipamentos				R\$ 1.600,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.600,00
Mão de obra própria				R\$ 2.998,65	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.998,65
Mão de obra de terceiros				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Transporte				R\$ 333,33	R\$ -	R\$ -	R\$ 333,33
Sub total - Custos diretos				R\$ 4.931,98	R\$ -	R\$ -	R\$ 4.931,98
CUSTOS INDIRETOS							
CUSTOS INDIRETOS				ORIGEM DOS RECURSOS			
Administração própria				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Marketing				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Treinamento e capacitação				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Descarte de materiais				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Medição e verificação				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Outros custos indiretos				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Sub total - Custos indiretos				R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos outros usos finais				R\$ 4.931,98	R\$ -	R\$ -	R\$ 4.931,98
OUTROS USOS FINAIS							
CUSTOS ANUALIZADOS							
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS			ORIGEM DOS RECURSOS				
Materiais e equipamentos	Vida útil (anos)	FRC	CA _{PEE}	CA _{TOTAL}			
1 Tomada inteligente	5,00	0,25046	R\$ 803,46	R\$ 803,46			
Custo anualizado total outros usos finais			CA _{TOUTROS}	R\$ 803,46	R\$ 803,46		

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

Para os custos da geração distribuída, foram utilizados os valores cotados de materiais e de serviços de instalação dos mesmos. De forma similar, para a geração distribuída espera-se utilizar as informações disponibilizadas pelo inversor de frequência como fonte de informações para as ações de medição e verificação (FIGURA 14).

FIGURA 14 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

FONTES INCENTIVADAS								
CUSTOS DIRETOS								
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS				ORIGEM DOS RECURSOS				
Materiais e equipamentos		Vida útil (anos)	Quantidade	Valor unitário	PEE	Terceiros	Consumidor	Total
1	Placa solar 260W com selo Procel	20,00	5	R\$ 1.400,00	R\$ 7.000,00		R\$ -	R\$ 7.000,00
2	Inversor de frequência 1500W com etiqueta Inmetro	10,00	1	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00		R\$ -	R\$ 2.500,00
Materiais e equipamentos					R\$ 9.500,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 9.500,00
Mão de obra própria					R\$ 2.998,65			R\$ 2.998,65
Mão de obra de terceiros		Quantidade	Horas	Valor da hora	PEE	Terceiros	Consumidor	Total
1	Mão de obra de instalação do sistema	1	1,00	R\$ 434,08	R\$ 434,08		R\$ -	R\$ 434,08
Diagnóstico energético					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Mão de obra de terceiros					R\$ 434,08	R\$ -	R\$ -	R\$ 434,08
Transporte					R\$ 333,33	R\$ -	R\$ -	R\$ 333,33
Sub total - Custos diretos					R\$ 13.266,06	R\$ -	R\$ -	R\$ 13.266,06
CUSTOS INDIRETOS								
CUSTOS INDIRETOS					ORIGEM DOS RECURSOS			
Administração própria					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Marketing					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Treinamento e capacitação					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Descarte de materiais					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Medição e verificação					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Outros custos indiretos					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Sub total - Custos indiretos					R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos fontes incentivadas					R\$ 13.266,06	R\$ -	R\$ -	R\$ 13.266,06

FONTES INCENTIVADAS					
CUSTOS ANUALIZADOS					
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS			ORIGEM DOS RECURSOS		
Materiais e equipamentos		Vida útil (anos)	FRC	CA _{PEE}	CA _{TOTAL}
1	Placa solar 260W com selo Procel	20,00	0,10185	R\$ 1.429,49	R\$ 1.429,49
2	Inversor de frequência 1500W com etiqueta Inmetro	10,00	0,14903	R\$ 747,01	R\$ 747,01
Custo anualizado total fontes incentivadas			CA _{TFI}	R\$ 2.176,49	R\$ 2.176,49

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

Conforme exigido pelo órgão regulador (ANEEL, 2013a), os custos de projetos do PEE devem ser separados por rubrica (FIGURA 15).

FIGURA 15 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS SEPARADOS POR RUBRICA

TIPO DE CUSTOS		CUSTOS TOTAIS		ORIGEM DOS RECURSOS		
		R\$	%	Recursos do PEE	Recursos de terceiros	Recursos do consumidor
CUSTOS DIRETOS						
Materiais e equipamentos	Previsto	R\$ 11.437,48	49,88%	R\$ 11.437,48	R\$ -	R\$ -
Mão de obra própria	Previsto	R\$ 8.995,95	39,23%	R\$ 8.995,95	R\$ -	R\$ -
Mão de obra de terceiros	Previsto	R\$ 434,08	1,89%	R\$ 434,08	R\$ -	R\$ -
Transporte	Previsto	R\$ 1.000,00	4,36%	R\$ 1.000,00	R\$ -	R\$ -
Custos diretos	Previsto	R\$ 21.867,51	95,36%	R\$ 21.867,51	R\$ -	R\$ -
CUSTOS INDIRETOS						
Administração própria	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Marketing	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Treinamento e capacitação	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Descarte de materiais	Previsto	R\$ 14,50	0,06%	R\$ 14,50	R\$ -	R\$ -
Medição e verificação	Previsto	R\$ 1.050,00	4,58%	R\$ 1.050,00	R\$ -	R\$ -
Outros custos indiretos	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos indiretos	Previsto	R\$ 1.064,50	4,64%	R\$ 1.064,50	R\$ -	R\$ -
Custo total do projeto	Previsto	R\$ 22.932,01	100,00%	R\$ 22.932,01	R\$ -	R\$ -

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

Também são apresentados os custos separados por rubrica e uso final, para fins de comparação (FIGURA 16).

FIGURA 16 - SIMULAÇÃO DOS CUSTOS SEPARADOS POR USO FINAL

POR USO FINAL		CUSTOS DO PEE				
		R\$	%	Iluminação	Outros usos finais	Fontes incentivadas
CUSTOS DIRETOS						
Materiais e equipamentos	Previsto	R\$ 11.437,48	49,88%	R\$ 337,48	R\$ 1.600,00	R\$ 9.500,00
Mão de obra própria	Previsto	R\$ 8.995,95	39,23%	R\$ 2.998,65	R\$ 2.998,65	R\$ 2.998,65
Mão de obra de terceiros	Previsto	R\$ 434,08	1,89%	R\$ -	R\$ -	R\$ 434,08
Transporte	Previsto	R\$ 1.000,00	4,36%	R\$ 333,33	R\$ 333,33	R\$ 333,33
Custos diretos	Previsto	R\$ 21.867,51	95,36%	R\$ 3.669,46	R\$ 4.931,98	R\$ 13.266,06
CUSTOS INDIRETOS						
Administração própria	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Marketing	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Treinamento e capacitação	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Descarte de materiais	Previsto	R\$ 14,50	0,06%	R\$ 14,50	R\$ -	R\$ -
Medição e verificação	Previsto	R\$ 1.050,00	4,58%	R\$ 1.050,00	R\$ -	R\$ -
Outros custos indiretos	Previsto	R\$ -	0,00%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos indiretos	Previsto	R\$ 1.064,50	4,64%	R\$ 1.064,50	R\$ -	R\$ -
Custo total do PEE	Previsto	R\$ 22.932,01	100,00%	R\$ 4.733,96	R\$ 4.931,98	R\$ 13.266,06

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

5.2.3 Cálculo da relação custo-benefício

De posse dos dados dos benefícios anuais e dos custos anualizados, é calculada a relação custo-benefício do projeto de eficiência energética, apresentado de forma global e separado por uso final para uma única residência (FIGURA 17).

FIGURA 17 - RCB DE PERFIL DE PESQUISA DE USOS E POSSES

CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO						
Uso final	EE Energia economizada MWh/ano	RDP Redução de demanda na ponta kW	CA _T PEE Custo anualizado PEE	BA _T Benefício anualizado total	RCB _{PEE} Por uso final PEE	RCB _{PEE}
Iluminação	0,51	0,20	R\$ 102,31	R\$ 301,34	0,34	1,85
Outros usos finais	0,12	0,09	R\$ 803,46	R\$ 103,16	7,79	
Fontes incentivadas	1,62	0,00	R\$ 2.176,49	R\$ 1.264,39	1,72	
Total	2,25	0,29	R\$ 3.082,27	R\$ 1.668,90	1,85	

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

5.3 SIMULAÇÃO DE PERFIS DE CONSUMO

A partir da simulação definido através da pesquisa de usos e posses de equipamentos (COPEL, 2012), foram idealizados novos cenários de simulação adaptados a partir dos perfis de consumo definido na pesquisa. Ressalta-se que a característica mais importante dos consumidores nas simulações que serão realizadas não é necessariamente o consumo total ou a renda familiar, e sim a elasticidade.

5.3.1 Perfil de baixa elasticidade

Este perfil é definido por um consumo entre 0 até 220 kWh. Ressalta-se que o perfil definido não tem relação com renda familiar, mas com a quantidade de equipamentos na residência com capacidade de serem controlados, ou seja, que possuem elasticidade. Para este perfil serão considerados somente os equipamentos definidos dentro do cenário de simulação (TABELA 14).

TABELA 14 - ESTIMATIVA DE RESIDÊNCIA DE BAIXA ELASTICIDADE

EQUIPAMENTOS	QUANTIDADE
Lâmpada halógena 50 W	1
Lâmpada fluorescente 15 W	2
Computador	1
Televisão CRT	1
Máquina de lavar roupa	1
Kit de geração solar de 1,3 kWp com inversor de 1,5 kW	1

FONTE: O autor (2016)

Com base nos equipamentos definidos para simulação (TABELA 14), foi calculada a relação custo-benefício para um perfil de baixa elasticidade (FIGURA 18). Verifica-se uma piora na relação custo-benefício, uma vez que se tratam de poucas ações resultando em menor economia e redução de demanda em horário de ponta.

FIGURA 18 - RCB DE PERFIL DE BAIXA ELASTICIDADE

CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO						
Uso final	EE Energia economizada MWh/ano	RDP Redução de demanda na ponta kW	CA _{T PEE} Custo anualizado PEE	BA _T Benefício anualizado total	RCB _{PEE} Por uso final PEE	RCB _{PEE}
Iluminação	0,13	0,05	R\$ 30,82	R\$ 77,40	0,40	2,23
Outros usos finais	0,03	0,00	R\$ 332,84	R\$ 9,84	33,84	
Fontes incentivadas	1,30	0,00	R\$ 2.088,50	R\$ 1.011,52	2,06	
Total	1,46	0,05	R\$ 2.452,16	R\$ 1.098,75	2,23	

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

5.3.2 Perfil de média elasticidade

Este perfil é definido por um consumo entre 221 kWh até 500 kWh, possuindo os seguintes equipamentos (TABELA 15).

TABELA 15 - ESTIMATIVA DE RESIDÊNCIA DE MÉDIA ELASTICIDADE

EQUIPAMENTOS	QUANTIDADE
Lâmpada halógena 50 W	5
Lâmpada fluorescente 15 W	15
Computador	2
Televisão CRT	1
Televisão LED	2
Aparelho de DVD	1
Forno de micro-ondas	1
Máquina de lavar roupa	1
Kit de geração solar de 1,3 kWp com inversor de 1,5 kW	1

FONTE: O autor (2016)

Com base nos equipamentos definidos para simulação (TABELA 15), foi calculada a relação custo-benefício para um perfil de média elasticidade (FIGURA 19). Este foi o perfil que mais se aproximou daquele definido através da pesquisa de usos e posses.

FIGURA 19 - RCB DE PERFIL DE MÉDIA ELASTICIDADE

CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO						
Uso final	EE Energia economizada MWh/ano	RDP Redução de demanda na ponta kW	CA _{T PEE} Custo anualizado PEE	BA _T Benefício anualizado total	RCB _{PEE} Por uso final PEE	RCB _{PEE}
Iluminação	0,73	0,29	R\$ 187,93	R\$ 428,34	0,44	1,83
Outros usos finais	0,13	0,09	R\$ 913,13	R\$ 108,27	8,43	
Fontes incentivadas	1,62	0,00	R\$ 2.198,73	R\$ 1.264,39	1,74	
Total	2,48	0,38	R\$ 3.299,78	R\$ 1.801,00	1,83	

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

5.3.3 Perfil de alta elasticidade

Este perfil é definido por um consumo acima de 501 kWh, possuindo os seguintes equipamentos (TABELA 16).

TABELA 16 - ESTIMATIVA DE RESIDÊNCIA DE ALTA ELASTICIDADE

EQUIPAMENTOS	QUANTIDADE
Lâmpada halógena 50 W	12
Lâmpada fluorescente 15 W	48
Computador	5
Televisão CRT	1
Televisão LED	5
Aparelho de DVD	2
Forno de micro-ondas	1
Máquina de lavar roupa	1
Máquina de lavar louça	1
Kit de geração solar de 1,3 kWp com inversor de 1,5 kW	1

FONTE: O autor (2016)

Com base nos equipamentos definidos para simulação (TABELA 16), foi calculada a relação custo-benefício para um perfil de alta elasticidade (FIGURA 20). Devido ao tipo de equipamentos presentes neste tipo de consumidor, foi possível um maior número de ações de eficiência energética, resultando em uma maior economia de energia e redução de demanda em horário de ponta.

FIGURA 20 - RCB DE PERFIL DE ALTA ELASTICIDADE

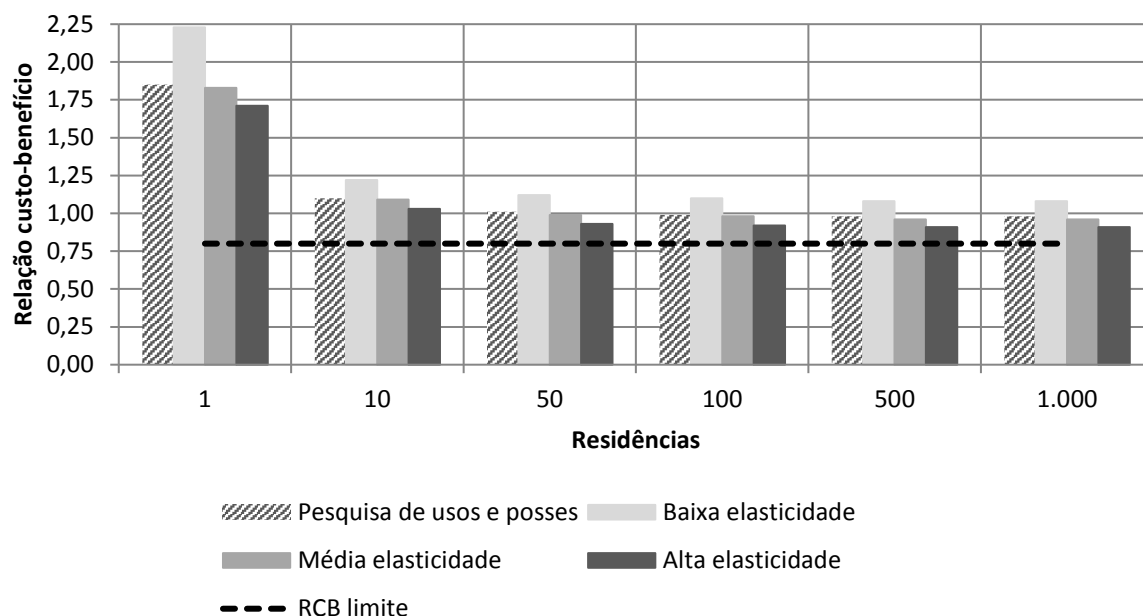
CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO						
Uso final	EE Energia economizada MWh/ano	RDP Redução de demanda na ponta kW	CA _T PEE Custo anualizado PEE	BA _T Benefício anualizado total	RCB _{PEE} Por uso final PEE	RCB _{PEE}
Iluminação	1,92	0,75	R\$ 557,37	R\$ 1.127,21	0,49	1,71
Outros usos finais	0,23	0,09	R\$ 1.604,87	R\$ 137,13	11,70	
Fontes incentivadas	1,62	0,00	R\$ 2.173,71	R\$ 1.264,39	1,72	
Total	3,77	0,84	R\$ 4.335,95	R\$ 2.528,73	1,71	

FONTE: Adaptado de Copel (2015)

5.4 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE NAS SIMULAÇÕES

Partindo da simulação de uma única residência, foram realizadas simulações variando alguns parâmetros específicos (os quais serão indicados) e mantendo os demais da forma como foram apresentados na simulação do caso elaborado a partir da pesquisa de usos e posses de equipamentos. Inicialmente será avaliada a variação provocada na relação custo-benefício pelo número de residências abrangidas (GRÁFICO 18).

GRÁFICO 18 - VARIAÇÃO DO NÚMERO DE RESIDÊNCIAS

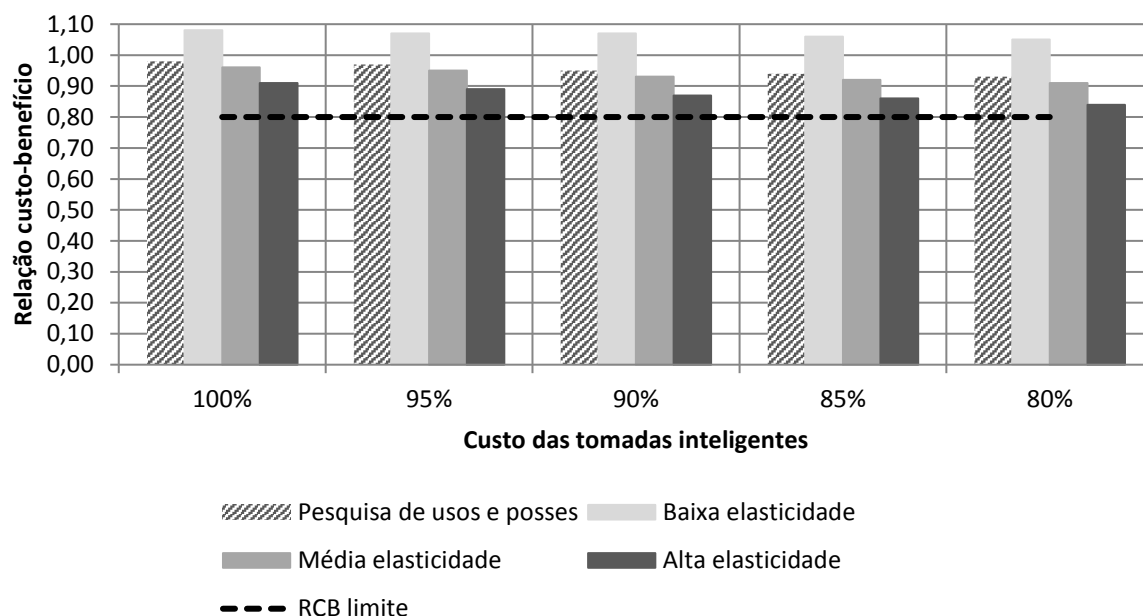


FONTE: O autor (2016)

Nota-se uma grande melhora na relação custo-benefício com o aumento do número de residências objeto de ações de eficiência energética, apesar da relação custo-benefício ainda estar acima do limite regulatório definido em 0,8 (ANEEL, 2013a). Esta melhora deve-se principalmente ao fato que os custos fixos do projeto são compensados com o aumento de escala.

Partindo do cenário com 1.000 residências, o qual apresentou a melhor relação custo-benefício, foram simulados outros cenários de forma a verificar qual seria o fator mais impactante na relação custo-benefício. Inicialmente será avaliado o impacto da variação dos custos das tomadas inteligentes (GRÁFICO 19), no qual é possível notar uma pequena variação na RCB para melhor em função da redução dos custos. A partir desta avaliação, nota-se que somente para o perfil de alta elasticidade houve uma melhora significativa da relação custo-benefício com a redução dos custos com tomadas inteligentes, demonstrando que somente estes consumidores estão se beneficiando de forma significativa destas ações de eficiência energética.

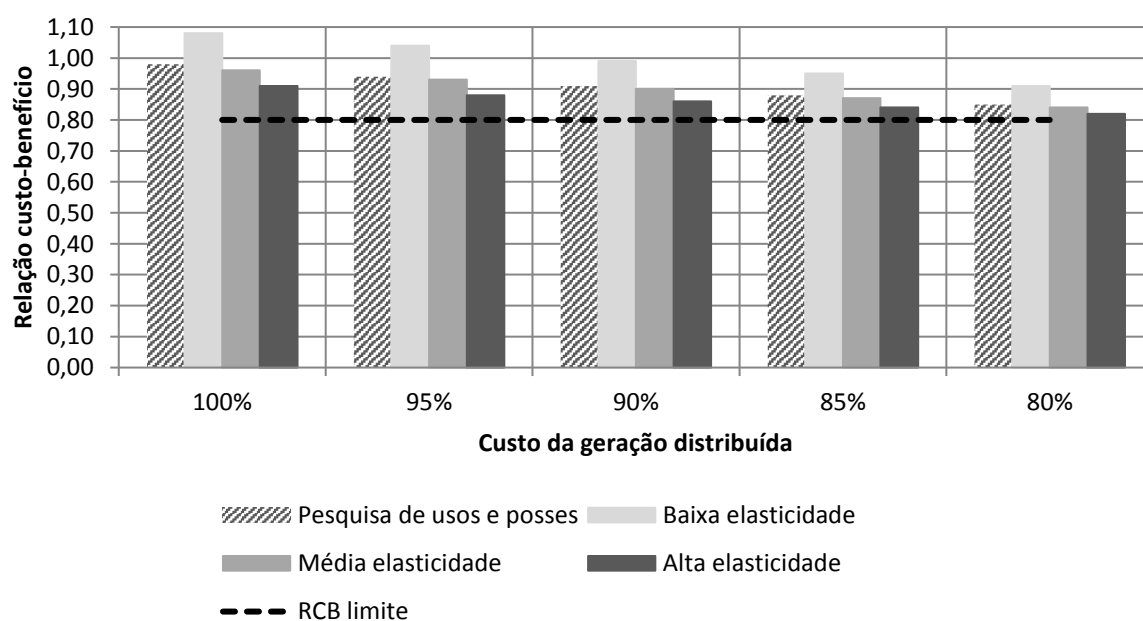
GRÁFICO 19 - VARIAÇÃO DO CUSTO DAS TOMADAS INTELIGENTES



FONTE: O autor (2016)

Também foi avaliada a variação da relação custo-benefício em função dos custos do kit de geração distribuída (GRÁFICO 20). É possível notar uma variação maior da RCB do que com as tomadas inteligentes, uma vez que os custos da geração distribuída são maiores do que das tomadas inteligentes (FIGURA 16).

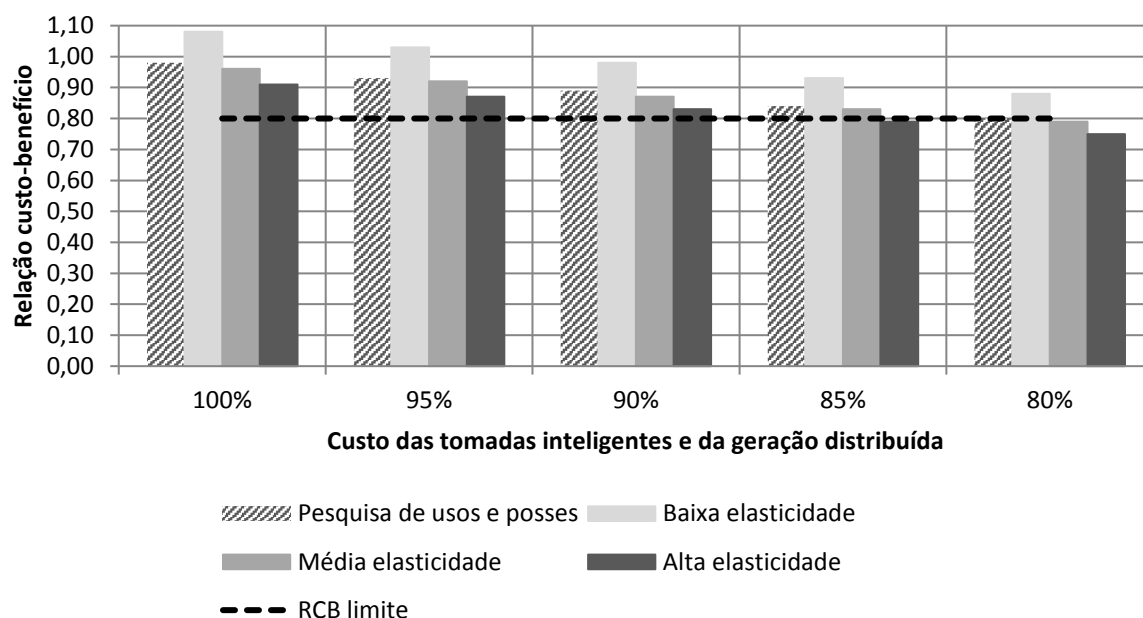
GRÁFICO 20 - VARIAÇÃO DO CUSTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA



FONTE: O autor (2016)

A partir deste cenário, foi analisada a variação da RCB causada pela redução simultânea nos custos das tomadas inteligentes e da GD (GRÁFICO 21).

GRÁFICO 21 - VARIAÇÃO DO CUSTO DAS TOMADAS INTELIGENTES E GD



FONTE: O autor (2016)

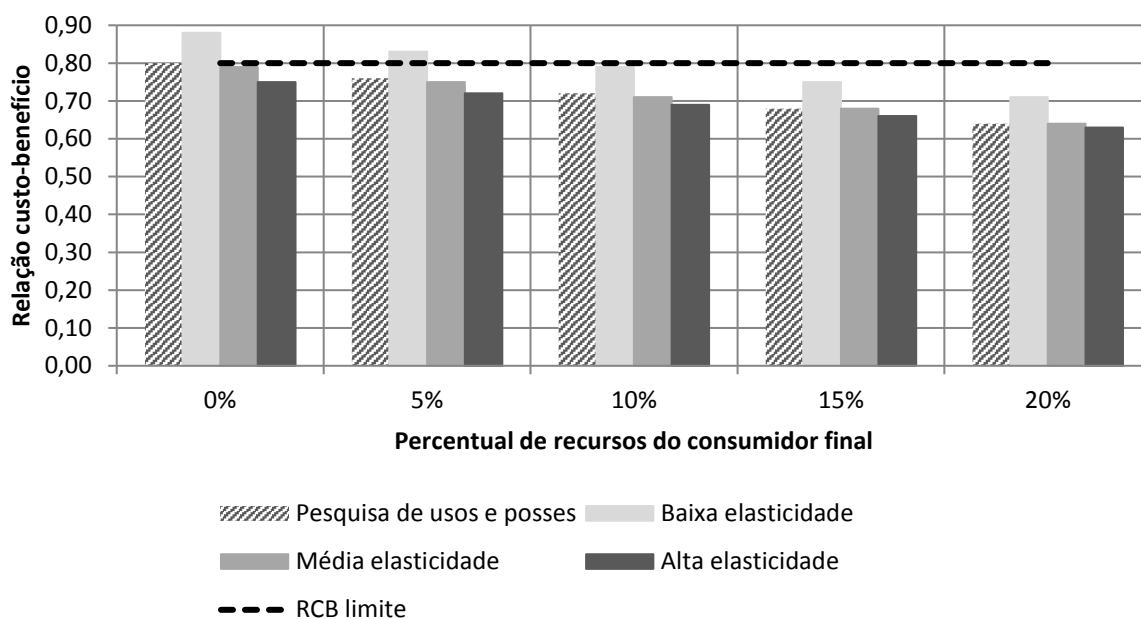
Mesmo no cenário de melhor viabilidade em termos de relação custo-benefício, o qual é composto pelos custos tanto das tomadas inteligentes quanto da geração distribuída em 80% do praticado atualmente (GRÁFICO 21), as ações de eficiência energética se mostraram economicamente inviáveis para um consumidor médio da distribuidora, o qual é representado pelo perfil estabelecido através de pesquisa de usos e posses. De forma análoga, os perfis de baixa e média elasticidade não atingiram o índice necessário de viabilidade. Já o perfil de alta elasticidade, por possuir maior número de equipamentos, se beneficia de forma mais significativa das ações de eficiência energética, sendo este o único perfil que atingiu o nível de viabilidade necessário para aplicação no PEE.

5.4.1 Análise do ponto de vista do consumidor final

Como forma de ampliar a atuação do Programa de Eficiência Energética, a ANEEL (2013a) estabelece que a viabilidade dos projetos no âmbito do PEE se dá através da análise dos custos do ponto de vista do PEE, ou seja, dos custos aportados

pelo programa. A partir deste mecanismo que permite que o consumidor compartilhe o custo da ação de eficiência energética, uma vez que ele será diretamente beneficiado, é estudado o impacto e o percentual necessário de contrapartida para atingir a viabilidade estabelecida para o Programa de Eficiência Energética (GRÁFICO 22).

GRÁFICO 22 - VARIAÇÃO DA ORIGEM DOS RECURSOS FINANCEIROS



FONTE: O autor (2016)

Para que as ações se viabilizem conforme regulamentação do PEE, para todos os casos simulados é necessário o emprego de uma contrapartida que, neste caso, está sendo considerada como sendo do consumidor final beneficiado.

Considerando maximizar a probabilidade de engajamento do consumidor final, aportando recursos do PEE próximo ao limite da viabilidade da ação de energética em termos de relação custo-benefício, porém mantendo uma margem de segurança de 20% na relação custo-benefício limite, de forma a evitar riscos de penalização na realização de investimentos consideravelmente altos, serão analisados os valores envolvidos individualmente por consumidor. Isso significa exigir a menor contrapartida possível de cada tipo de consumidor, de modo que a relação custo-benefício fique o mais próximo possível a 0,64, mas permanecendo abaixo deste limite (TABELA 17).

TABELA 17 - ANÁLISE DE CUSTOS POR CONSUMIDOR FINAL

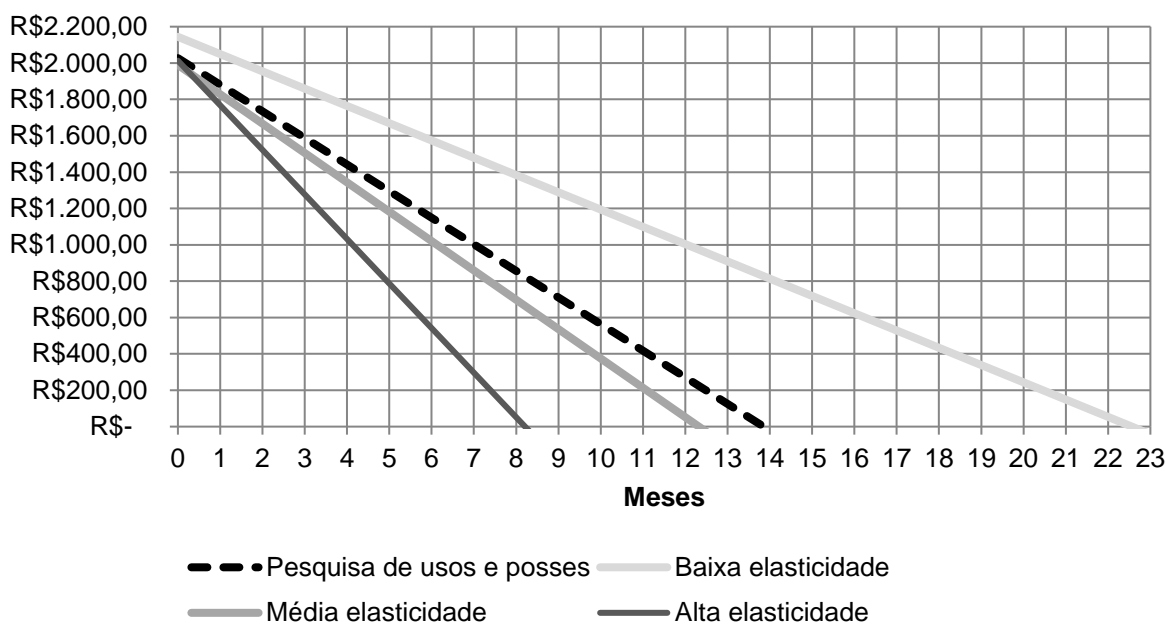
PERFIL DE CONSUMIDOR	USOS E POSSES	BAIXA ELASTICIDADE	MÉDIA ELASTICIDADE	ALTA ELASTICIDADE
Contrapartida	21%	29%	21%	19%
Valor da contrapartida	R\$ 2.026,83	R\$ 2.144,28	R\$ 1.989,56	R\$ 2.012,88
Benefício mensal	R\$ 146,31	R\$ 95,04	R\$ 161,48	R\$ 245,17
Retorno do investimento	13,9 meses	22,6 meses	12,3 meses	8,2 meses

FONTE: O autor (2016)

Analisando graficamente o tempo de retorno do investimento do consumidor final (GRÁFICO 23), é possível visualizar que o perfil de alta elasticidade é o mais vantajoso em termos de viabilidade. Supondo ainda que o consumidor deste perfil possui, em média, um maior poder aquisitivo do que os demais, sendo o mais provável de dispor dos recursos financeiros necessários para o empenho da contrapartida necessária.

O estudo do retorno do investimento (GRÁFICO 23) foi realizado considerando a tarifa paga atualmente pelo consumidor final, ou seja, a modalidade tarifária convencional. Para os consumidores atendidos em baixa tensão, enquadrando-se nestes os consumidores residenciais, esta tarifa caracteriza-se por um único valor da energia elétrica, independente do horário em que ela está sendo utilizada.

GRÁFICO 23 - RETORNO DO INVESTIMENTO PARA O CONSUMIDOR

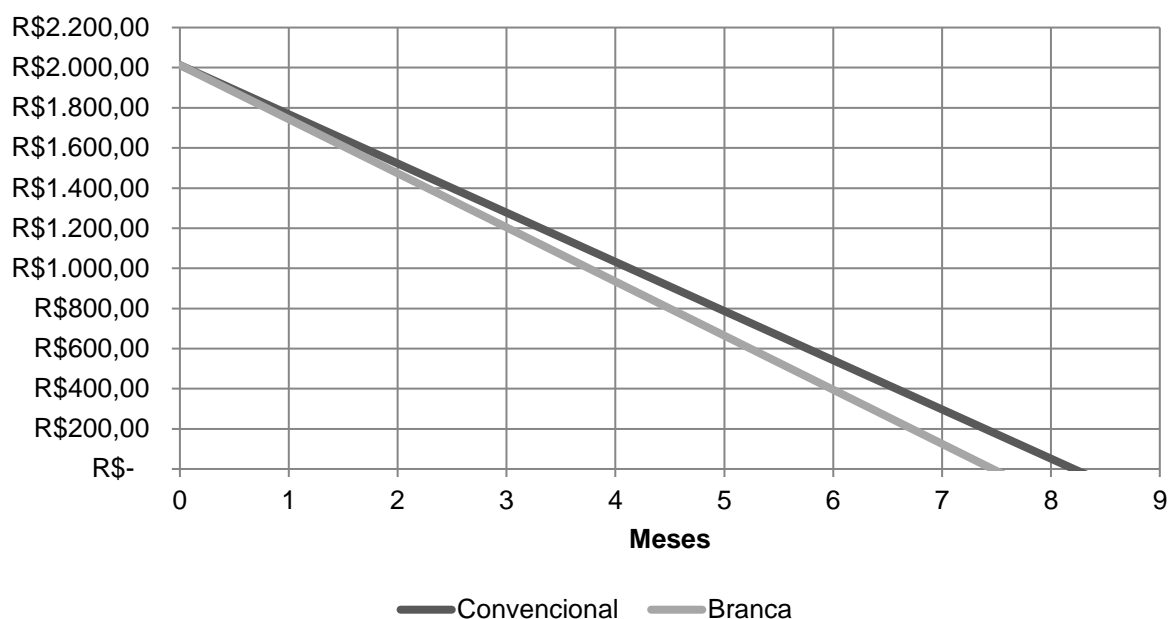


FONTE: O autor (2016)

Apesar de não estar sendo operacionalizada, a modalidade tarifária branca já está homologada pela ANEEL (2015). Esta tarifa apresenta valores diferenciados para o consumo em diferentes horários do dia, sendo caracterizada por ponta (18h00 às 21h00), intermediária (17h00 às 18h00 e 21h00 às 22h00) e fora de ponta (0h00 às 17h00 e 22h00 às 24h00). Desta forma é concedida uma tarifa reduzida para o consumidor que deslocar suas cargas para o horário fora de ponta.

A partir da tarifa branca é possível refinar o estudo de retorno do investimento para os consumidores com perfil de alta elasticidade, uma vez que para estes consumidores mais efetivas as ações de eficiência energética através de tomadas inteligentes. Neste caso é traçado um paralelo entre o tempo de retorno do investimento realizado por um consumidor deste perfil utilizando a tarifa convencional e a branca (GRÁFICO 24).

GRÁFICO 24 - RETORNO DO INVESTIMENTO PERFIL ALTA ELASTICIDADE



FONTE: O autor (2016)

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Com as simulações realizadas foi possível observar que as ações de eficiência energética impactam de forma diferente na relação custo-benefício final. Tomando como exemplo a simulação realizada com base na pesquisa de usos e posses de equipamentos (FIGURA 17), nota-se que a RCB da iluminação é 0,34,

sendo viável dentro do Programa de Eficiência Energética. Observando individualmente as ações referentes à tomadas inteligentes e geração distribuída, os quais apresentaram RCB de 7,79 e 1,72, respectivamente, nota-se que estas ações apresentam uma relação custo-benefício altamente desfavorável, uma vez que o limite aceitável pela ANEEL (2013a) é 0,80. A viabilidade destas ações, quando combinadas, totalizou 1,85.

Outro ponto importante é o fator de escala, que impacta fortemente na relação custo-benefício das ações de eficiência energética. Pode-se observar uma grande melhora na RCB das ações com o aumento no número de residências a serem eficientizadas (GRÁFICO 18). Nesta mesma análise foi possível notar uma melhora na RCB em função do tipo de residência em que se estão sendo realizadas as ações de eficiência energética. Observa-se uma melhora na relação custo-benefício para unidades consumidoras com maior elasticidade de carga, ou seja, existem mais equipamentos que consomem energia elétrica e que são possíveis de ser controlados através de tomadas inteligentes.

Observa-se também que os custos relacionados às tomadas inteligentes e geração distribuída podem ser considerados elevados dentro de um cenário no qual se busca a viabilidade destas ações. Mesmo reduzindo os custos de implantação (GRÁFICO 21), a relação custo-benefício destas ações ainda está acima do limite regulatório, demonstrando que ainda é necessário um amadurecimento de mercado para que estas tecnologias sejam aplicadas em escala no Programa de Eficiência Energética.

Analisando as ações de eficiência energética, imaginando um mercado já amadurecido, com tecnologias de redes elétricas inteligentes já consolidadas e, conseqüentemente, com custos reduzidos para aplicação, mesmo assim as ações propostas não se viabilizaram através de uma única fonte de recursos. Através do emprego de recursos oriundos de contrapartida do consumidor final, foi levantado o cenário em que estas ações se viabilizaram. Reforçando a conclusão anterior sobre a maior viabilidade destas ações em consumidores de maior elasticidade, novamente obteve-se o mesmo resultado, uma vez que este tipo de consumidor, em função de suas características de consumo, necessitaria uma menor contrapartida em termos percentuais e tem o mais breve tempo de retorno de investimento.

Por fim observa-se que a aplicação da tarifa pode ser um incentivo para o engajamento dos consumidores para aderirem às ações de eficiência energética

propostas, desde que estes tenham características de elasticidade de carga, o que resulta na indicação de consumidores com perfil de alto consumo.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Observando de um ponto de vista mundial, as indústrias, unidades comerciais e outras instalações que utilizam energia elétrica de forma intensiva, recorrentemente investem recursos em ações de eficiência energética, visando ampliar sua competitividade perante um mercado cada vez mais competitivo. Os consumidores residenciais, por outro lado, não seguem a mesma linha, talvez pelo desconhecimento dos benefícios que eles mesmos podem obter ou por uma acomodação, causada pela falta de informações corretas sobre a essência da eficiência energética, levando os estes mesmos consumidores a aceitarem pagar um valor elevado nas contas de energia em nome, por exemplo, de um conforto pessoal.

As distribuidoras de energia elétrica, através de seus Programas de Eficiência Energética, vêm sistematicamente investindo um grande volume de recursos em melhorias e redução de perdas no sistema elétrico, através de ações de eficiência energética em consumidores finais de energia elétrica. Estas ações são benéficas tanto aos consumidores quanto às distribuidoras, uma vez que a redução da ineficiência do sistema elétrico é benéfica a toda a sociedade, postergando investimentos em expansões de rede e diminuindo o percentual de perdas que são arcadas pelos consumidores através da tarifa de energia elétrica.

Dentro deste contexto foram levantadas, através de uma análise tecnológica e regulatória, as ações possíveis de serem realizadas no Programa de Eficiência Energética visando à inserção de tecnologia de redes elétricas inteligentes em clientes residenciais. O PEE configura-se como a maior fonte de recursos em âmbito nacional para eficiência energética, o que o torna um importante agente potencializador para a disseminação de tecnologias de redes elétricas inteligentes voltadas para o gerenciamento do lado da demanda.

Para tanto foi levantado o estado da arte sobre as tecnologias de redes elétricas inteligentes com potencial de inserção nos consumidores residenciais. Historicamente as ações de eficiência energética realizadas em residências consistiam basicamente de substituições diretas de equipamentos, sendo que este levantamento foi importante para delinear quais tecnologias e metodologias mais promissoras estão sendo empregadas atualmente, visando ampliar as possibilidades de ações nestes consumidores.

Complementando com uma análise do arcabouço regulatório do setor elétrico brasileiro sobre redes elétricas inteligentes, foi possível definir qual é o estado atual do setor no ponto de vista de maturidade para aplicação das tecnologias estudadas nesta dissertação. Destaca-se, no entanto, que o tema é bastante recente, sendo que atualmente não existe uma regulamentação específica sobre o tema. Ocorre que algumas resoluções podem auxiliar na viabilização das redes elétricas inteligentes, tais como tarifas diferenciadas, incentivos para a redução de perdas no sistema elétrico e incentivos à inserção de geração distribuída.

De forma a definir um cenário de viabilidade da aplicação das tecnologias de redes elétricas, foram estudadas as tecnologias que serão aplicadas em ações de gerenciamento pelo lado da demanda. Levando em consideração o cenário dos consumidores residenciais, foram delineados os equipamentos mais comuns de serem encontrados e que tivessem características de elasticidade de carga, ou seja, que possam ser controlados para que funcionem em horários específicos de acordo com um critério definido que, no caso do setor elétrico, é trabalhar fora do horário de ponta. Também se observa o desenvolvimento da geração distribuída que, no setor residencial, caracteriza-se principalmente pela inserção de painéis fotovoltaicos.

Partindo da definição do cenário de ações de eficiência energética, foi desenvolvida uma metodologia para inserção destas tecnologias de gerenciamento pelo lado da demanda em consumidores residenciais. Como o Programa de Eficiência Energética foi considerado como um importante agente fomentador, foi utilizada a metodologia estabelecida para o PEE para sistemas de iluminação e da geração distribuída. Como a metodologia do PEE não prevê todas as ações pretendidas nesta dissertação foi desenvolvida uma metodologia para inserção de tomadas inteligentes no âmbito do Programa de Eficiência Energética, de modo a quantificar seu potencial de economia, permitindo assim calcular a economia de energia e redução de demanda em horário de ponta a serem obtidas com sua utilização.

De posse da metodologia com abrangência a todas as ações de eficiência energética pretendidas, foram realizadas diversas simulações de forma a verificar a viabilidade técnica e econômica destas ações. Como resultado destas simulações foi possível observar que a relação custo-benefício destas ações de eficiência energética ainda é bastante desfavorável.

Diante de um cenário desfavorável, foram simuladas outras situações, de forma a definir um panorama de viabilidade para as mesmas. Foi possível verificar

que a relação custo-benefício para as ações estudadas nesta dissertação são mais favoráveis quando aplicadas em consumidores com perfil de alta elasticidade. Estes consumidores, possuindo maior elasticidade de carga, dispõem em suas residências de diversos equipamentos energeticamente intensivos que podem ser comandados de forma a operar em condições mais vantajosas, diferentemente de outros segmentos, como o de baixa elasticidade, que se caracteriza por um número reduzido de cargas controláveis, não sendo favoráveis as ações de eficiência energética propostas.

Também foram analisados os aspectos financeiros das ações de eficiência energética propostas. Ao variar os custos envolvidos nestas ações, pode-se observar uma sensível melhora na viabilidade com a redução de custos das tomadas inteligentes e da geração distribuída, uma vez que estas tecnologias estão em processo de amadurecimento, possuindo potencial para redução de preços no mercado. Mesmo com essa redução de custos não se chegou à viabilidade destas ações em termos de relação custo-benefício.

A viabilidade das ações propostas somente foi atingida quando foram utilizadas outras fontes de recursos. Mesmo sendo o PEE a maior fonte nacional de recursos para eficiência energética, demonstra-se que somente estes recursos não são suficientes em termo de viabilidade técnico-econômica, sendo necessários aportes financeiros dos consumidores que serão beneficiados. Novamente verifica-se que a viabilidade destas ações é maior em consumidores com perfil de alta elasticidade, apresentando um tempo de retorno desta contrapartida em um tempo menor. É importante frisar que, dentro das condições apresentadas, as ações não seriam economicamente viáveis somente no âmbito do Programa de Eficiência Energética ou somente para o consumidor final. O que tornou viável esta aplicação foi a soma de esforços de ambas as partes.

Ao supor a utilização de contrapartida, foi estudado o tempo de retorno desta contrapartida dada pelo consumidor. Nota-se mais uma vez que perfil de consumidor que mais teria vantagens seria o de alta elasticidade, uma vez que o investimento do consumidor seria menor e o seu benefício maior do que para os demais consumidores. Para o perfil de alta elasticidade de carga foi estudado ainda o tempo de retorno no caso da aplicação da tarifa branca de energia elétrica, permitindo reduzir ainda mais o tempo de retorno.

Conforme citado por Moura *et al.* (2013), as redes elétricas podem ser representadas de acordo com sua fase de maturidade. Atualmente, as redes elétricas inteligentes estão em sua fase inicial, sendo que as ações de eficiência energética devem ser condizentes com o que é possível dentro do atual cenário. Ressalta-se que, posteriormente, com o avanço das redes elétricas inteligentes, poderão surgir novas oportunidades de ações.

Traçando um panorama de viabilidade mais aprofundado, somente a viabilidade técnico-econômica pode não ser a única resposta das ações de eficiência energética envolvendo tomadas inteligentes. Existe uma crescente conscientização da população a respeito do tema de sustentabilidade, levando um número cada vez maior de pessoas a adotarem medidas ambientalmente responsáveis no dia a dia. Ações enfatizando a redução de toneladas de carbono emitidas para a atmosfera podem ser utilizadas como alternativa para engajar os consumidores para estas ações.

6.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

No estágio atual de desenvolvimento das redes elétricas inteligentes, não é possível agregar os elementos de uma residência de forma que todos estes equipamentos funcionem de forma a otimizar a operação do sistema elétrico.

Espera-se que, futuramente, com o amadurecimento das redes elétricas inteligentes e do mercado, exista uma gama maior de equipamentos que possam se beneficiar das redes elétricas inteligentes e que o leque de ações de eficiência energética possíveis seja ampliado. Quando houverem equipamentos com inteligência para alterar seu perfil de consumo através de, por exemplo, um sistema de tarifação dinâmica, as possibilidades de ações de gerenciamento pelo lado da demanda serão aumentadas significativamente. Neste caso, será necessário um novo estudo sobre como desenvolver ações para que estas ações possam ser efetivamente aplicadas.

Juntamente com o desenvolvimento das aplicações e amadurecimento do mercado, podem ser desenvolvidos mecanismos de controle de fontes incentivadas e de equipamentos conectados em tomadas inteligentes pelas distribuidoras, visando realizar o deslocamento dessas cargas de acordo com a disponibilidade da rede.

Apesar de a pesquisa realizada na presente dissertação ter sido focada em consumidores residenciais de energia elétrica, é possível a aplicação da mesma metodologia de tomadas inteligentes desenvolvida para outros consumidores, tais como industriais ou comerciais. Neste caso, o proponente destas ações deve analisar quais equipamentos possuem características que o permitam ser controlados sem prejuízo às atividades realizadas pelos estabelecimentos.

De forma a estimular o desenvolvimento deste mercado, é importante que medidas sejam tomadas de forma a estimular a criação de uma demanda. Além de desenvolver as tecnologias propriamente ditas, é importante desenvolver também um mecanismo que permita o engajamento do consumidor final para a tecnologia de redes elétricas inteligentes. Entende-se que este engajamento é crucial, uma vez que o desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias realizado pelas distribuidoras de energia elétrica envolvendo a rede elétrica podem não ter o resultado esperado sem os meios efetivos de controle de cargas, dentre as quais uma significativa proporção corresponde às cargas residenciais.

REFERÊNCIAS

AL-MULLA, A.; ELSHERBINI, A. Demand management through centralized control system using power line communication for existing buildings. *Energy Conversion and Management*, v. 79, p. 477–486, 2014. Elsevier Ltd.

AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a Smart Grid. *IEEE Power & Energy Magazine*, p. 34–41, 2005.

ANEEL. Resolução Normativa nº 479, de 3 de abril de 2012. Altera a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, que estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília - DF, 2012a.

ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília - DF, 2012b.

ANEEL. Procedimentos do Programa de Eficiência Energética. 2013a. Brasília - DF.

ANEEL. Resolução Normativa nº 556, de 18 de junho de 2013. Aprovar os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE. Brasília - DF, 2013b.

ANEEL. Resolução Homologatória nº 1.897, de 16 de junho de 2015. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2015, as Tarifas de Energia - TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição - TUSD referentes à Copel Distribuição S.A. – Copel-DIS e dá outras providências. Brasília - DF, 2015a.

ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, 2015b.

ANEEL. Geração distribuída amplia número de conexões em 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=9044&id_area=>>. Acesso em: 22/01/2016.

BRASIL. Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000 e suas alterações. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica. Brasília - DF, 2000.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília - DF, 2001.

BRASIL. Medida provisória nº 579, de 11 de setembro de 2012. Dispõe sobre as concessões de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sobre a redução dos encargos setoriais, sobre a modicidade tarifária, e dá outras providências.

Brasília - DF, 2012.

BROWN, M. A. Enhancing efficiency and renewables with smart grid technologies and policies. *Futures*, v. 58, p. 21–33, 2014. Elsevier Ltd.

CGEE. Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional. 2012. Brasília - DF. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/publicacoes/documentos_tecnicos.php>.

COPEL. Pesquisa de Usos e Posse de Equipamentos - Consumidor Residencial Urbano. Curitiba - PR, 2012.

COPEL. Chamada Pública PEE Copel 001/2015. 2015. Curitiba - PR.

COPEL. Paraná Smart Grid. 2016. Curitiba - PR.

CUSTÓDIO, E. S. Desenvolvimento de um Micromedidor Inteligente para Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Redes Elétricas Inteligentes. 2013. Universidade Federal do Paraná.

DAIMON. Relatório caracterização da carga da Copel. Curitiba - PR, 2011.

ELETROBRAS. Critérios para a Concessão do Selo Procel de Economia de Energia a Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado (Revisão - 1). 2015. Rio de Janeiro - RJ.

EPE. Balanço Energético Nacional. , 2013. Rio de Janeiro - RJ.

EVO. Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance. 2012.

FALCÃO, D. M. Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, p. 1–5, 2010. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/bahia/files/2013/10/Palestra-Prof-Djalma-Falcao.pdf>>.

GELLINGS, C. W. The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, v. 73, n. 10, p. 1468–1470, 1985.

GELLINGS, C. W.; SAMOTYJ, M. Smart Grid as advanced technology enabler of demand response. *Energy Efficiency*, v. 6, n. 4, p. 685–694, 2013.

DI GIORGIO, A.; PIMPINELLA, L.; QUARESIMA, A.; CURTI, S. An event driven Smart Home Controller enabling cost effective use of electric energy and automated Demand Side Management. 2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), p. 358–364, 2011.

MARQUES, M. C. S. M.; HADDAD, J.; GUARDIA, E. C. Eficiência Energética: Teoria & Prática. Itajubá, MG: Eletrobrás/PROCEL Educação, FUPAI, 2007.

MOMOH, J. Smart grid: fundamentals of design and analysis. Wiley, 2012.

MOURA, P. S.; LÓPEZ, G. L.; MORENO, J. I.; DE ALMEIDA, A. T. The role of Smart

Grids to foster energy efficiency. *Energy Efficiency*, v. 6, n. 4, p. 621–639, 2013.

NIST. About Smart Grid. Disponível em: <www.nist.gov/smartgrid>. Acesso em: 08/08/2015.

PALENSKY, P.; KUPZOG, F. Smart Grids. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 38, n. 1, p. 201–226, 2013.

PROCEL. Estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>>. Acesso em: 30/01/2016.

YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 12, p. 5673–5689, 2013.

ZIPPERER, A.; ALOISE-YOUNG, P. A.; SURYANARAYANAN, S.; et al. Electric Energy Management in the Smart Home: Perspectives on Enabling Technologies and Consumer Behavior. *Proceedings of the IEEE*, v. 101, n. 11, 2013.