



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Bruno Gregorio Menita

**MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
ENVOLVENDO SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM
HABITAÇÕES DE FAMÍLIAS DE BAIXA RENDA**

Goiânia, 2015

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Bruno Gregorio Menita

**MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
ENVOLVENDO SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM
HABITAÇÕES DE FAMÍLIAS DE BAIXA RENDA**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS- IFG) - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Energias Renováveis e Engenharia Econômica
Aplicada

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos

Coorientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

Goiânia, 2015

M545m Menita, Bruno Gregorio.

Medição e verificação em projetos de eficiência energética envolvendo sistemas de aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda / Bruno Gregorio Menita. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2016.
107 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos
Co-orientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui apêndice.

Inclui anexos.

1. Aquecimento solar de água – Habitações de famílias de baixa renda. 2. Aquecimento solar de água - Eficiência energética – Medição e verificação de performance. I. Domingos, José Luis (orientador). II. Domingues, Elder Geraldo (co-orientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 333.796 3

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Bruno Gregorio Menita

MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
ENVOLVENDO SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM HABITAÇÕES
DE FAMÍLIAS DE BAIXA RENDA

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS- IFG) - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Energias Renováveis e Engenharia Econômica
Aplicada

Prof. Dr. José Luis Domingos, IFG (orientador)

Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues, IFG (coorientador)

Profa. Dra. Elizabeth Marques Duarte Pereira, UFMG/Centro Universitário UNA

Profa. Dra. Simone Souza Ramalho, IFG

Prof. Dr. Pedro José Abrão, IFG (suplente)

Aprovado em: ___/___/___

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Regina (in memoriam) e Paulo, a meus familiares e às pessoas importantes em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas dificuldades e suas soluções.

Aos meus pais Regina (in memoriam) e Paulo, e a Marina, pelo apoio em todos os momentos, e pelos exemplos de vida.

A Camila, pela paciência e parceria.

A meus familiares, pelas orações e vibrações positivas.

A meus amigos, pelos incentivos e comemorações.

Aos Professores José Luis Domingos e Elder Domingues, pelas ideias e disponibilidade de tempo e atenção para a orientação. Aos professores, colaboradores e colegas do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Goiás, pela ajuda em diversos momentos. A Adriano Faria, Marcio Miguel e equipe da CELG-D, pela oportunidade e viabilização deste trabalho. Aos Professores Agenor Garcia e Elizabeth Pereira, pelas valiosas contribuições e direcionamentos. A todos os mencionados, pela amizade que surgiu nos últimos anos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

TÍTULO: MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ENVOLVENDO SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM HABITAÇÕES DE FAMÍLIAS DE BAIXA RENDA

Autor: Bruno Gregorio Menita

Orientador: Dr. José Luis Domingos

Coorientador: Dr. Elder Geraldo Domingues

RESUMO

O aquecimento solar de água em unidades habitacionais de famílias de baixa renda como Ação de Eficiência Energética possibilita ganhos energéticos do ponto de vista do consumidor e do sistema elétrico brasileiro, além de redução de impactos ambientais associados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Busca-se no presente trabalho avaliar estes ganhos através de Medição e Verificação baseada em metodologia adaptada do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance, a partir de estudos de caso envolvendo Projetos de Eficiência Energética no Estado de Goiás. Apresenta-se também o desenvolvimento de modelagem estocástica para a geração de cenários futuros da economia de energia elétrica resultante de Projeto de Eficiência Energética envolvendo aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda. A modelagem é desenvolvida utilizando-se o processo estocástico denominado Movimento Geométrico Browniano com Reversão para a Média (MGB-RM), associado à técnica de simulação de Monte Carlo. Os resultados obtidos mostram que a energia elétrica economizada a partir da substituição de chuveiros elétricos por sistemas de aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda possui grande potencial de trazer benefícios financeiros para tais famílias, e que a redução na demanda de ponta obtida a partir desta Ação de Eficiência Energética é vantajosa para o sistema elétrico brasileiro. Também compõem os resultados do trabalho o passeio aleatório resultante da simulação das séries temporais e a Função de Densidade de Probabilidade obtida para cada ano do horizonte da simulação, além de análise de sensibilidade dos parâmetros desvio padrão e velocidade de reversão para a média componentes da modelagem estocástica, uma vez que ainda não existem dados históricos disponíveis para obtenção destes parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecimento solar de água; Eficiência Energética; Medição e Verificação de Performance.

TITLE: MEASUREMENT AND VERIFICATION IN ENERGY EFFICIENCY PROJECTS INVOLVING SOLAR WATER HEATING SYSTEMS IN HOMES OF LOW-INCOME FAMILIES

Author: Bruno Gregorio Menita

Adviser: Dr. José Luis Domingos

Co-adviser: Dr. Elder Geraldo Domingues

ABSTRACT

Solar water heating in homes of low-income families as Energy Efficiency Action enables energetic benefits from points of view of the consumer and the Brazilian electrical system, thereby reducing environmental impacts associated with generation, transmission and distribution of electricity. The purpose of the present study is to evaluate these gains through measurement and verification methodology adapted from the International Performance Measurement and Verification Protocol, from case studies involving Energy Efficiency Projects in the Goiás State, Brazil. It is also presented the development of stochastic modeling for generation of future scenarios of electricity savings from Energy Efficiency Project involving solar water heating in homes of low-income families. The model is developed applying the Geometric Brownian Motion stochastic process with Mean Reversion (GBM-MR), associated with the technique of Monte Carlo simulation. Results show that the electricity saved from the replacement of electric showers by solar water heating systems in homes of low-income families has great potential to bring financial benefits to such families, and that the reduction in peak demand obtained from this Energy Efficiency Action is advantageous to the Brazilian electrical system. There are also obtained as results of the simulation of time series the random walk of the aleatory variable Electricity Savings and the probability density function for each year of the simulation time horizon, and a sensitivity analysis of the parameters standard deviation and mean reversion speed of the stochastic model, once there is no historical data available for obtaining these parameters.

KEYWORDS: Solar Water Heating; Energy Efficiency; Performance Measurement and Verification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de um sistema de aquecimento solar.....	29
Figura 2: Sistema de aquecimento solar com coletor plano com cobertura	30
Figura 3: Coletor solar plano sem cobertura	31
Figura 4: Coletor solar de tubo a vácuo.....	31
Figura 5: Crescimento da área instalada de coletores solares no mundo de 2009 a 2013.....	32
Figura 6: Participação de países ou regiões na área instalada de coletores solares em 2013 ...	33
Figura 7: Crescimento da área instalada de coletores solares no Brasil de 2009 a 2013	33
Figura 8: Projeção do consumo de energia elétrica residencial e dos chuveiros elétricos de uso doméstico.....	35
Figura 9: Projeção da penetração de sistemas de aquecimento solar no setor residencial até 2030	35
Figura 10: Projeção da economia de energia com a utilização de sistemas de aquecimento solar de água.....	36
Figura 11: Localização do Setor Orlando de Moraes.....	54
Figura 12: Localização do Residencial Real Conquista	55
Figura 13: Definição da amostragem inicial no PEE Residencial Orlando de Moraes.....	59
Figura 14: Medidor de energia utilizado	59
Figura 15: Extração de dados de medição	60
Figura 16: Aba de apoio da Planilha Auxiliar	63
Figura 17: Alimentação dos dados na Planilha Principal	64
Figura 18: Cálculos estatísticos dos dados de medição para verificação da economia de energia elétrica.....	65
Figura 19: Cálculos relativos à verificação de correlação na Planilha Principal.....	65
Figura 20: Resultados estatísticos como dados de entrada para cálculos finais.....	66
Figura 21: Resultados finais dos cálculos de economia de energia e redução na demanda de ponta	67
Figura 22: Perfil de utilização do chuveiro ao longo do dia - PEE Orlando de Moraes	78
Figura 23: Perfil de utilização do chuveiro ao longo do dia - PEE Real Conquista.....	78
Figura 24: Perfil de utilização do chuveiro ao longo do dia - PEE Município de Itumbiara ...	78
Figura 25: Comportamento da variável aleatória ao longo do passeio aleatório.....	87
Figura 26: Séries temporais da economia anual de energia para 2.000 cenários	87
Figura 27: FDP dos valores de economia anual de energia no tempo.....	88

Figura 28: Amplitude dos valores de economia de energia variando-se σ e η	89
Figura 29: Média e desvio padrão dos valores de economia de energia variando-se σ e η	90
Figura 30: Média e desvio padrão dos valores de economia de energia variando-se σ	91
Figura 31: Média e desvio padrão dos valores de economia de energia variando-se η	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados dos cálculos de consumo de energia elétrica evitado com PEE Residencial Orlando de Moraes.	69
Tabela 2: Resultados dos cálculos de redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Moraes.	70
Tabela 3: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção do consumo de energia evitado com PEE Residencial Orlando de Moraes.	70
Tabela 4: Incerteza relativa relacionada ao consumo de energia evitado com PEE Residencial Orlando de Moraes.	71
Tabela 5: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção da redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Moraes.	71
Tabela 6: Incerteza relativa relacionada à redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Moraes.	71
Tabela 7: Resultados dos cálculos de consumo de energia elétrica evitado com PEE Residencial Real Conquista.	72
Tabela 8: Resultados dos cálculos de redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Moraes.	73
Tabela 9: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção do consumo de energia evitado com PEE Residencial Real Conquista.	73
Tabela 10: Incerteza relativa relacionada ao consumo de energia evitado com PEE Residencial Real Conquista.	74
Tabela 11: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção da redução na demanda de ponta com PEE Residencial Real Conquista.	74
Tabela 12: Incerteza relativa relacionada à redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Moraes.	74
Tabela 13: Resultados dos cálculos de consumo de energia elétrica evitado com PEE Município de Itumbiara.	75
Tabela 14: Resultados dos cálculos de redução na demanda de ponta com PEE Município de Itumbiara.	76
Tabela 15: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção do consumo de energia evitado com PEE Município de Itumbiara.	76

Tabela 16: Incerteza relativa relacionada ao consumo de energia evitado com PEE Município de Itumbiara.....	77
Tabela 17: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção da redução na demanda de ponta com PEE Município de Itumbiara.....	77
Tabela 18: Incerteza relativa relacionada à redução na demanda de ponta com PEE Município de Itumbiara.....	77
Tabela 19: Comparação de dados e resultados de economia de energia dos PEE	79
Tabela 20: Comparação de dados e resultados de economia de energia dos PEE	80
Tabela 21: Resultados de redução na demanda de ponta com os PEE.....	82
Tabela 22: Cálculo do custo da redução na demanda de ponta com PEE nº 883/ANEEL	84
Tabela 23: Custo de geração elétrica obtido de dados de leilões de energia.....	84
Tabela 24: Comparativo da incerteza calculada para economia de energia nos estudos de caso	85
Tabela 25: Comparativo da incerteza calculada para redução na demanda de ponta nos estudos de caso	85
Tabela 26: Dados de entrada para simulação	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	Variável aleatória que segue Processo Estocástico de Wiener Generalizado
\bar{a}	Média dos valores da variável aleatória ao longo do passeio aleatório
ABRADEE	Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
AEE	Ação de Eficiência Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANS	Ajuste de Nível de Serviço
b	Coefficiente de regressão
CED	Custo unitário de redução na demanda de ponta
CEE	Custo unitário de economia de energia elétrica
CELG-D	Celg Distribuição S/A
C_{de}	Consumo no período de determinação da economia
C_{lb}	Consumo no período de linha de base
$C_{ustORDP}$	Custo da redução na demanda de ponta com PEE
cv	Coefficiente de variação adotado para cálculo do número inicial de amostras
cv_r	Coefficiente de variação real calculado a partir dos valores do parâmetro-chave medido
$CV(EMQ)$	Coefficiente de variação do erro médio quadrático
D_{de}	Demanda de ponta no período de determinação da economia
D_{lb}	Demanda de ponta no período de linha de base

e	Nível de precisão da amostragem
EE	Economia de energia elétrica
EE_{883}	Economia de energia elétrica com PEE nº 883/ANEEL
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S/A
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EP	Erro padrão do parâmetro-chave medido
EP_a	Erro padrão de amostragem
EP_c	Erro padrão combinado
EP_m	Erro padrão de medição
EP_r	Erro padrão do modelo de regressão linear
EUA	Estados Unidos da América
EVO	<i>Efficiency Valuation Organization</i>
F	Função que representa o processo de Itô
FDP	Função Densidade de Probabilidade
I_a	Incerteza absoluta do parâmetro-chave medido
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
I_r	Incerteza relativa do parâmetro-chave medido
$Investimento_{RDP}$	Investimento no PEE nº 883/ANEEL
M&V	Medição e Verificação
MDS	Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome
MGB	Movimento Geométrico Browniano
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia

N	Tamanho da população
n	Número de amostras ajustado para pequenas populações
n_0	Número inicial de amostras
NCl	Número de classes do histograma
NCn	Número de cenários simulados
p	Número de variáveis independentes
p_m	Precisão do medidor de energia
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
P_a	Precisão absoluta do parâmetro-chave medido
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem Solar
PEE	Projeto de Eficiência Energética
PIMVP	Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance
PNE2030	Plano Nacional de Energia
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
P_r	Precisão relativa do parâmetro-chave medido
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROPEE	Procedimentos do Programa de Eficiência Energética
R^2	Coefficiente de determinação
RD	Redução de demanda no horário de ponta
RD_{883}	Redução na demanda de ponta com PEE nº 883/ANEEL
<i>Residência.Dia</i>	Unidade que define a amostragem de um PEE
s	Desvio padrão dos valores do parâmetro-chave medido
SAS	Sistema de Aquecimento Solar
t	Tempo
st	Valor padrão de distribuição normal obtido na Tabela-t para nível de confiança de 95% e $n-1$ graus de liberdade

st_{∞}	Valor padrão de distribuição normal obtido na Tabela-t para nível de confiança de 95% e infinitos graus de liberdade
W	Watt: unidade de potência elétrica
Wh	Watt-hora: unidade de energia elétrica
W_{th}	Watt térmico: unidade de potência térmica produzida
\bar{x}	Média aritmética dos valores da variável independente
x_i	Valor da variável independente
\bar{y}	Média aritmética dos valores do parâmetro-chave medido
y_i	Valor do parâmetro-chave medido
\hat{y}_i	Valor do parâmetro-chave ajustado pelo modelo para dado ponto usando o valor da variável independente correspondente
z	Variável aleatória em um processo de Wiener
η	Velocidade de reversão para a média
μ	Constante que representa a tendência da série temporal
σ	Constante que representa a volatilidade do passeio aleatório
φ	Variável randômica com distribuição normal padronizada – N(0,1)

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	19
2	CAPÍTULO II – AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA: ASPECTOS DE MERCADO E INSERÇÃO NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO BRASILEIRO.....	28
2.1	INTRODUÇÃO	28
2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E TENOLOGIAS DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA	28
2.3	ASPECTOS DOS MERCADOS MUNDIAL E NACIONAL.....	31
2.4	AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO BRASILEIRO E EM PROGRAMAS DE GOVERNO	34
2.5	CONCLUSÃO.....	37
3	CAPÍTULO III – PROCEDIMENTOS PARA A OBTENÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE DEMANDA DE PONTA	38
3.1	INTRODUÇÃO	38
3.2	VERIFICAÇÃO DE ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE DEMANDA DE PONTA COM PEE A PARTIR DE PROCEDIMENTO ADAPTADO DO PIMVP.....	38
3.3	OBTENÇÃO DE CENÁRIOS DE ECONOMIA DE ENERGIA RESULTANTE DE PEE.....	46
3.4	CONCLUSÃO.....	52
4	CAPÍTULO IV – ESTUDOS DE CASOS: RESULTADOS	53
4.1	INTRODUÇÃO	53
4.2	VERIFICAÇÃO DE ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE DEMANDA DE PONTA COM PEE A PARTIR DE PROCEDIMENTO ADAPTADO DO PIMVP.....	53
4.2.1	<i>Definições para estudos de caso e aplicação do procedimento de M&V.....</i>	53
4.2.2	<i>Definição do número de amostras inicial.....</i>	58
4.2.3	<i>Obtenção dos valores dos parâmetros-chave a partir de medição.....</i>	59
4.2.4	<i>Cálculos de economia de energia e redução na demanda de ponta.....</i>	60
4.2.5	<i>Apresentação dos resultados obtidos</i>	68
4.2.6	<i>Considerações sobre os resultados.....</i>	77
4.3	PROJEÇÃO DE CENÁRIOS DE ECONOMIA DE ENERGIA RESULTANTE DE PEE.....	86
4.3.1	<i>Definições para a simulação das séries temporais.....</i>	86
4.3.2	<i>Análise dos resultados da simulação das séries temporais</i>	86
4.3.3	<i>Análise de sensibilidade de valores atribuídos.....</i>	88
4.4	CONCLUSÃO.....	91
5	CAPÍTULO V – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS	100
	TRABALHOS PUBLICADOS EM ANAIS DE EVENTOS.....	103
	TRABALHOS ACEITOS PARA APRESENTAÇÃO EM EVENTOS.....	103

APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO PARA OBTENÇÃO DA MODELAGEM ESTOCÁSTICA DO MGB COM REVERSÃO PARA A MÉDIA.....	104
ANEXO A – QUESTIONÁRIO APLICADO EM RESIDÊNCIAS DO PEE	106
ANEXO B – PLANILHA AUXILIAR E SEUS COMPONENTES DE ALIMENTAÇÃO E DE CÁLCULO	107
RESUMO DO CURRÍCULO LATTES	108

1 CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica em termos mundiais exige planejamento e busca de alternativas para que esta seja atendida. Cada vez mais é também visível a necessidade deste atendimento ser sustentável, tendo em vista os problemas ambientais que a humanidade enfrenta e enfrentará como consequência de suas atividades. Neste contexto, o estudo das fontes alternativas de energia ganha importância, e, dentre estas, a energia solar apresenta um grande potencial de utilização, tanto para a geração de energia elétrica como para o aquecimento de água, contribuindo este último para redução da demanda de energia elétrica, uma vez que evita a necessidade de sua geração, transmissão e distribuição para tal utilização.

O aquecimento solar de água vem sendo utilizado comercialmente desde a década de 70, com maior crescimento deste mercado na década de 90, tanto em panorama nacional como mundial. No Brasil, programas de governo recentes impulsionaram a utilização do aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda, com destaques para o Programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal, no qual é obrigatório o uso de tal tecnologia em unidades novas, e para os Projetos de Eficiência Energética - PEE - envolvendo aquecimento solar das concessionárias de distribuição de energia elétrica, componentes do Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (ELETROBRAS, 2012).

Entende-se como família de baixa renda aquela abrangida pelo Cadastro Único para Programas Sociais do Governo Federal, respeitando os critérios de renda mensal de até meio salário mínimo por pessoa ou renda mensal familiar de até três salários mínimos (MDS, 2014). No caso do Programa Minha Casa Minha Vida, a modalidade de financiamento para famílias de baixa renda engloba aquelas com renda familiar de até R\$ 1.600,00.

De acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), Eficiência Energética “refere-se a ações de diversas naturezas que culminam na redução da energia necessária para atender as demandas da sociedade por serviços de energia sob a forma de luz, calor/frio, acionamento, transportes e uso em processos”. Ainda, “objetiva, em síntese, atender às necessidades da economia com menor uso de energia primária e, portanto, menor impacto da natureza” (MME, 2011 – a).

Uma Ação de Eficiência Energética (AEE) corresponde a uma ação tomada para que se obtenham ganhos energéticos de eficiência. A substituição de chuveiros elétricos por sistemas de aquecimento solar de água para banho é um exemplo de AEE.

Estudos realizados no Brasil apresentam informações importantes sobre o aquecimento solar de água residencial, sua utilização em conjuntos habitacionais de famílias de baixa renda e a importância o uso de equipamentos componentes do sistema de aquecimento solar (SAS) com alta eficiência.

Com base na última Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso, realizada pelas Centrais Elétricas Brasileiras S/A (ELETROBRAS) em 2005 e publicada em 2007, verificou-se o uso de chuveiros elétricos para banho em 73,2% dos domicílios brasileiros, além de estimativa de 24% de participação do chuveiro elétrico no consumo total residencial de energia elétrica. Verificou-se também que o chuveiro elétrico é utilizado principalmente no horário de ponta do Sistema Elétrico Brasileiro (ELETROBRAS, 2012). Logo, é possível através destes dados visualizar significância em termos de redução de consumo e de demanda de energia elétrica no horário de ponta ao se incentivar a utilização de aquecimento solar de água como alternativa ao chuveiro elétrico.

Em pesquisa apresentada em ELETROBRAS (2012) e realizada em um projeto piloto composto por 100 sistemas híbridos em habitações populares de Contagem-MG na primeira metade da década de 2.000, cujo sistema foi composto por um reservatório de 200 litros, uma placa coletora de 2 metros quadrados, e um chuveiro elétrico de baixa potência, a economia de energia elétrica, em relação ao uso exclusivo do chuveiro elétrico, foi de 35%, em média, com base apenas na comparação de contas de energia no período monitorado. Apesar de não ser possível atribuir tal economia exclusivamente à utilização dos sistemas híbridos, este resultado mostra possível ganho econômico a partir da utilização dos mesmos em residências populares.

Em dois estudos realizados sobre economia de energia elétrica a partir da utilização de energia solar para aquecimento de água por Cardoso e Nogueira (2011) e publicado pelos mesmos autores em ELETROBRAS (2012), utilizou-se o Método da Fração Solar (Método F) para estimar a fração da energia convencional não consumida devido à utilização de sistemas de aquecimento solar. A fração solar é calculada a partir de equações empíricas e parâmetros adimensionais propostos, utilizando-se parâmetros variáveis com relação a características ambientais, como radiação solar, e dos componentes do sistema de aquecimento. No primeiro estudo mencionado, para as considerações feitas neste, estimou-se aproximadamente 1.073 GWh de economia de energia elétrica no Brasil, em 2008, a partir da utilização de energia

solar para aquecimento de água em substituição à energia proveniente da rede de distribuição, enquanto a redução na demanda de ponta de energia elétrica foi estimada em 1.220 MW.

No segundo estudo mencionado, o Método da Fração Solar é utilizado para determinar a economia de energia elétrica a partir da utilização de equipamentos com Selo Procel Eletrobrás. Com as considerações feitas neste estudo, verificou-se que a economia de energia elétrica a partir da utilização de coletores solares com Selo Procel Eletrobrás, em substituição aos equipamentos sem este selo, foi de 29,38 GWh no país, em 2011, com redução na demanda de ponta de 399,56 MW. Já a utilização de reservatórios térmicos com o Selo Procel Eletrobrás proporcionou economia de 22,64 GWh de energia elétrica, com 6,46 MW de redução na demanda de ponta. Ao se considerar ambos os equipamentos com o devido selo, a economia de energia elétrica foi de 52,03 GWh.

Os resultados dos trabalhos mencionados mostram que o aquecimento solar de água residencial possui potencial de proporcionar benefícios quando contemplado em uma AEE. A Lei nº 9.991 de 24 de julho de 2000 regulamenta a obrigatoriedade de investimentos de empresas concessionárias e permissionárias distribuidoras de energia elétrica no Brasil em PEE, consolidando assim o Programa de Eficiência Energética. Este investimento foi definido em 0,5% da receita operacional líquida de tais empresas. Dos recursos referentes a este, 50% foi estabelecido pela ANEEL em 2005 como percentual obrigatório a ser aplicado junto a consumidores residenciais de baixa renda. Este percentual foi alterado para no mínimo 60% pela Lei 12.212/2010, utilizando-se como critério o benefício do consumidor pela tarifa social (MME, 2011 - a).

Os PEE, além de proporcionarem economia de energia e redução de demanda de ponta, promovem a criação de polos industriais relacionados à cadeia produtiva de equipamentos necessários para as AEE, estimulam P&D através da divulgação das tecnologias envolvidas e promovem a diversificação da matriz energética brasileira. Os benefícios decorrentes de AEE podem ser avaliados sob as óticas: dos consumidores, que economizam financeiramente com a redução do consumo de energia elétrica; do setor energético, que posterga investimentos em geração, transmissão e distribuição, em consequência da redução da demanda por energia elétrica; e da sociedade, devido à redução das tarifas médias e dos impactos ambientais associados ao setor elétrico (ELETROBRAS, 2012).

As três óticas são abrangidas em relação aos PEE que contemplam aquecimento solar de água para famílias de baixa renda. Quanto à ótica do setor energético, a grande contribuição está na redução da demanda do horário de ponta – “período este composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga do

seu sistema elétrico (ANEEL Resolução Normativa nº 414/2010)”. Além de postergação de investimentos em capacidade instalada, este benefício contribui diretamente para o aumento da confiabilidade do sistema e redução das perdas. Sob as óticas do consumidor e da sociedade, a redução do consumo de energia elétrica proporciona incremento no orçamento familiar. Destaca-se também a disponibilidade de água quente para banho mesmo durante períodos de falta de energia (ELETROBRAS, 2012). No Brasil, não há documento oficial do governo ou de outras instituições nacionais adotado como referência para Medição e Verificação (M&V) de projetos onde se é necessário avaliar ganhos energéticos a partir de ações para este fim. Como alternativa, o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) vem sendo utilizado por instituições e profissionais. Segundo o PIMVP, M&V consiste no “processo de utilização de medições para determinar, de modo seguro, a economia real criada dentro de uma instalação individual por um programa de gestão de energia”. A M&V aumenta a credibilidade dos resultados da avaliação dos ganhos energéticos (EVO, 2012).

O PIMVP foi elaborado pela *Efficiency Valuation Organization* (EVO), uma sociedade privada sem fins lucrativos que conta com a contribuição voluntária de profissionais de destaque em M&V de todo o mundo. O PIMVP pode ser utilizado para várias aplicações em que é necessário avaliar resultados e preparar relatórios de economia de energia elétrica e água. Com relação às atividades de M&V: “As atividades de M&V incluem estudos no local; medição de energia ou de água; monitoramento de variáveis independentes, cálculos e apresentação de relatórios. Quando aderem às recomendações do PIMVP, estas atividades de M&V podem produzir relatórios da economia verificada” (EVO, 2012).

Em determinadas situações, a utilização do PIMVP é obrigatória, como é o caso de PEE das concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica, cuja M&V e demais etapas para obtenção dos resultados devem ser baseadas no PIMVP, conforme Resolução Normativa 176/2005 (ANEEL, 2014 – a). Porém, apesar de muito abrangente, o PIMVP estabelece critérios que, para a realidade de muitos PEE, tornam estes economicamente inviáveis, principalmente devido a longos períodos de medições necessários.

Neste contexto, a Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica - ABRADDEE - gerenciou o desenvolvimento de procedimentos de M&V adaptados do PIMVP em PEE por uso final, contando com contribuições de consultorias e parcerias. Desta forma, foram definidas metodologias adaptadas de M&V por uso final aprovadas pela ANEEL, as quais foram repassadas para as distribuidoras de energia elétrica através de treinamento

realizado no mês de Setembro de 2014, devendo ser aplicadas a partir de então para avaliação de PEE.

Estudo pioneiro em relação à M&V em sistemas residenciais de aquecimento solar de água realizado por Christensen e Burch (1994) fornece um conjunto de objetivos de monitoramento, os quais variam de acordo com a finalidade deste e podem ser separados em dois grupos: Avaliação de Impacto, que engloba impactos no consumo e na demanda de energia elétrica; e Desempenho Medido Versus Previsto, que engloba eficiência de funcionamento dos sistemas recém instalados e ao longo do tempo e a validação de modelos de simulação computacional de previsão de redução de consumo e demanda de energia.

Christensen e Burch (1994) explicam que vários níveis de monitoramento podem ser utilizados, dependendo do número e frequência das variáveis a serem medidas. Por exemplo, para verificação de impacto na demanda, pode haver a necessidade de medição e gravação de dados a cada minuto ou até intervalos menores. Já para verificação de eficiência no longo prazo, pode haver apenas a necessidade de medições mensais do calor fornecido pelo sistema de aquecimento solar (SAS). O custo também pode ser um fator definidor do nível de monitoramento, sendo possível, dependendo do caso, utilizar representação de medição contínua por algumas medições. A extrapolação dos dados obtidos em amostragem para a população depende de medições, durante os períodos determinados, de variáveis ambientais na região, como temperatura e incidência de radiação solar.

Ainda de acordo com Christensen e Burch (1994), é necessário realizar medições também em condições de referência, para comparação com as medições em unidades com sistemas de aquecimento solar instalados, assim como definir modelos para estabelecer a equivalência de condições entre os casos. Como exemplos de condições para referência, pode-se adotar um Grupo de Controle, composto por unidades habitacionais sem aquecimento solar de água, mas com características próximas das unidades com SAS. Outra opção é o monitoramento “*Before-After*”, em que medições são realizadas anteriormente e posteriormente à instalação dos sistemas nas mesmas residências. Para este último, deve-se levar em conta que a instalação do sistema pode mudar o hábito de banho dos moradores da residência, por criar-se a imagem de que, com a redução do custo com energia elétrica, o tempo de banho e conseqüentemente o consumo de água quente podem ser maiores, por exemplo.

Na literatura, há artigos publicados com exemplos de projetos envolvendo uma ou mais AEE em que a M&V tem como referência o PIMVP. De Bod, Grobler e De Villiers (2012) buscam definir uma metodologia de M&V para avaliação da economia energética de

AEE aplicada em bombas elétricas de aquecimento de água no setor comercial sul-africano, assim como o impacto da AEE na demanda de energia elétrica do país. Neste trabalho, os autores descrevem passos importantes da definição da metodologia, com base no PIMVP, além de indicarem dificuldades e desafios encontrados, de maneira a evitá-los em outros projetos.

No estudo de De Bod, Grobler e De Villiers (2012), primeiramente a linha de base, que corresponde ao período anterior à instalação dos equipamentos responsáveis pela AEE é determinada a partir de medições de consumo de energia elétrica antes da implantação da AEE, em amostras de caldeiras posteriormente extrapoladas para a população de cada segmento comercial. Em seguida, define-se o Ajuste de Nível de Serviço (ANS) para a linha de base, utilizando-se como parâmetro independente a energia térmica fornecida pelos sistemas de aquecimento de água, pois este parâmetro não deve ser alterado pela AEE. O ANS serve para transportar os valores de consumo de energia da linha de base para as condições operacionais dos sistemas após a implementação da AEE, de forma a ser possível o cálculo da economia de energia.

Dentre as quatro opções de M&V apresentadas pelo PIMVP, Barnard e Grobler (2012) utilizam a opção B para a quantificação da economia a partir de AEE em sistemas de transporte de ar comprimido para minas de extração de minérios. Segundo estes, a etapa crítica consiste na definição da metodologia de linha de base, que engloba as médias diárias de demanda de energia pelos compressores inclusos nos limites do sistema em análise. Para isto, o maior desafio encontrado é a definição do ANS, que consiste em uma metodologia de ajuste dos dados da linha de base, de forma que permaneçam relevantes ao longo do tempo. A base para o ANS é a definição do parâmetro independente no sistema que não mudará com as AEE, de forma a possibilitar a valoração do consumo de energia sob as mesmas condições caso não houvesse AEE. Identificar o parâmetro independente é desafiador, porém crucial para a M&V. Logo, os autores apresentaram metodologias para a realização desta etapa, comparando-as quanto à adequação ao caso específico do estudo, o que pode ser grande contribuição para outros projetos e estudos que necessitem realizar tais definições.

O PIMVP geralmente é utilizado como referência para M&V envolvendo projetos industriais, de grande porte ou que tenham contrato de gestão energética entre partes. Em projetos onde a AEE está relacionada ao aquecimento solar de água residencial, destaca-se o estudo pioneiro realizado por Kaiser e Pulsipher (2010) sobre economia de energia elétrica utilizando o PIMVP em residências do Programa *Louisiana Home Energy Rebate Offer*, nos EUA. Os resultados preliminares indicam que não houve economia significativa de energia

elétrica com as modificações realizadas nas residências. De uma amostra de sessenta residências, dezenove apresentam economia de energia, enquanto trinta e três têm aumento no consumo de energia após as modificações do programa. As demais residências não puderam ter seus resultados considerados por questões estatísticas.

Modelagem estocástica e simulação computacional de séries temporais sintéticas compõem metodologia já utilizada para fins como precificação de ativos no mercado financeiro, planejamento da expansão da geração elétrica para atendimento da demanda de um estado ou país, e planejamento de processos que envolvem filas cujo comportamento está sujeito a leis probabilísticas. Estas leis também podem influenciar o comportamento da economia de energia elétrica resultante de um PEE ao longo do tempo.

Segundo Fonseca (2006), a simulação de Monte Carlo possui aplicação para precificação de opções no mercado financeiro, uma vez que há fatores de risco que não são facilmente tratados através de soluções analíticas. O autor realiza a comparação entre os processos estocásticos Movimento Geométrico Browniano e Movimento de Reversão à Média na simulação componente do cálculo do fluxo de caixa *at risk* de um departamento empresarial. Bacen (2007) e Dozza (2012) apresentam também estudos relacionados à precificação de ativos financeiros a partir de processos estocásticos e simulação de Monte Carlo.

Segundo Domingues (2003), vários processos estocásticos têm sido utilizados no Mercado Elétrico Brasileiro para modelar as incertezas presentes no mesmo, tais como preço à vista, afluência dos reservatórios, demanda elétrica e consumo de energia elétrica, variáveis que são aleatórias e, portanto podem ter seus comportamentos representados por séries temporais.

Aplicações industriais também são realidade quanto à aplicação da simulação de Monte Carlo. Saraiva Júnior, Rodrigues e da Costa (2010) utilizam esta ferramenta para decisão do *mix* de produtos de grande variabilidade de custo unitário em uma empresa, enquanto Garcia, Lustosa e Barros (2010) aplicam o método na previsão de custos de produção de companhias industriais.

Outras áreas de conhecimento também têm a aplicação do método para resolução de problemas: Vilcapoma, Moura e Sampaio (2014) consideram aspectos estocásticos para projetar e dimensionar a construção de rodovias; Donatelli e Konrath (2005) exploram a aplicação da simulação de Monte Carlo na avaliação de incertezas de medição; Yoriyaz (2009) por sua vez aborda tal aplicação em processos da física médica, como cálculo de dose absorvida e outras grandezas que podem apresentar comportamento probabilístico.

Considerando-se os cenários formados pelas informações expostas até aqui, são definidos o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho. Os procedimentos de M&V adaptados do PIMVP são aplicados em estudos de caso envolvendo PEE da Celg Distribuição S/A (CELG-D), tendo como AEE o aquecimento solar residencial em habitações de famílias de baixa renda, buscando assim, atingir tais objetivos.

O objetivo geral do trabalho consiste em obter resultados que expressem os efeitos da utilização do aquecimento solar de água em unidades habitacionais de famílias de baixa renda, para os moradores, o sistema elétrico e a sociedade, a partir de Medição e Verificação em Projetos de Eficiência Energética da CELG-D, aplicando-se o procedimento adaptado do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance.

Já os objetivos específicos consistem em:

1. verificar a economia média de energia elétrica mensal para consumidores a partir de Projetos de Eficiência Energética que contemplem aquecimento solar de água;
2. verificar o impacto na demanda instantânea de energia elétrica no horário de ponta a partir de Projetos de Eficiência Energética que contemplem aquecimento solar de água;
3. realizar diagnóstico e apontar contribuições para melhoria no procedimento de Medição e Verificação adaptado do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance;
4. realizar modelagem estocástica e simulação computacional para a obtenção de séries temporais que fornecem projeção de cenários de economia de energia obtida a partir de Projeto de Eficiência Energética envolvendo aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda.

Para o alcance dos objetivos supracitados, esta dissertação foi organizada conforme os capítulos descritos a seguir:

- o Capítulo I apresenta informações relevantes para a contextualização das necessidades que levaram à formação dos objetivos do trabalho, assim como para o alcance destes;
- o Capítulo II apresenta aspectos dos mercados nacional e mundial de aquecimento solar de água, assim como projeções e metas governamentais acerca de sua utilização no Brasil;

- o Capítulo III estabelece a metodologia utilizada para se atingir os objetivos do trabalho;
- o Capítulo IV apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia, buscando-se destacar as contribuições resultantes desta aplicação;
- o Capítulo V contém as conclusões obtidas a partir dos resultados do trabalho e da experiência proporcionada pela pesquisa, assim como algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 CAPÍTULO II – AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA: ASPECTOS DE MERCADO E INSERÇÃO NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO BRASILEIRO

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contempla informações sobre a inserção do aquecimento solar de água nos mercados mundial e nacional, a fim de permitir que o leitor se interesse acerca da proporção atual da utilização desta tecnologia, assim como projeções sobre esta utilização no futuro, dada a inclusão do aquecimento solar de água no planejamento energético brasileiro e em programas de governo. Primeiramente apresenta-se o princípio de funcionamento do sistema de aquecimento solar de água e principais tecnologias em coletores solares.

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E TECNOLOGIAS DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

O princípio de funcionamento do aquecimento solar de água consiste na captação da radiação solar e transferência desta energia térmica para a água que será utilizada em aplicações diversas. De acordo com Madeira (2013), um Sistema de Aquecimento Solar (SAS) de água é constituído necessariamente por coletores solares responsáveis por absorver a radiação solar, um reservatório (ou *boiler*) responsável por armazenar a água aquecida, e tubulações de interligação. Em função de condições específicas do local e da instalação, o sistema pode também possuir reservatório de alta pressão, quando há grande diferença de altura entre a caixa d'água e o reservatório térmico ou é necessário pressurizador na entrada de água deste, e bombas hidráulicas, quando é necessário realizar movimentação forçada da água. A Figura 1 apresenta um SAS de água residencial com seus principais componentes.

A partir da Figura 1, é possível observar que o reservatório principal de água fornece água fria através de tubulações tanto para consumo na residência como para ser aquecida através do sistema. A radiação solar é absorvida por superfície de cor preta presente nos coletores solares, na forma plana ou tubular, de acordo com a tecnologia empregada. A superfície enegrecida possui alta absorvância, o que possibilita que maior parte da energia térmica que chega não seja transferida para outros meios. Tubos em contato direto com a superfície enegrecida permitem que o calor seja transferido para a água que, conforme é aquecida, desloca-se pelos tubos em direção ao reservatório térmico através de efeito de termossifão, em que as partículas mais quentes do fluido tendem a se deslocar para cima, em

decorrência de menor densidade em relação às partículas frias. A água aquecida é armazenada no reservatório térmico, ficando assim disponível para ser distribuída através de tubulações para a instalação.

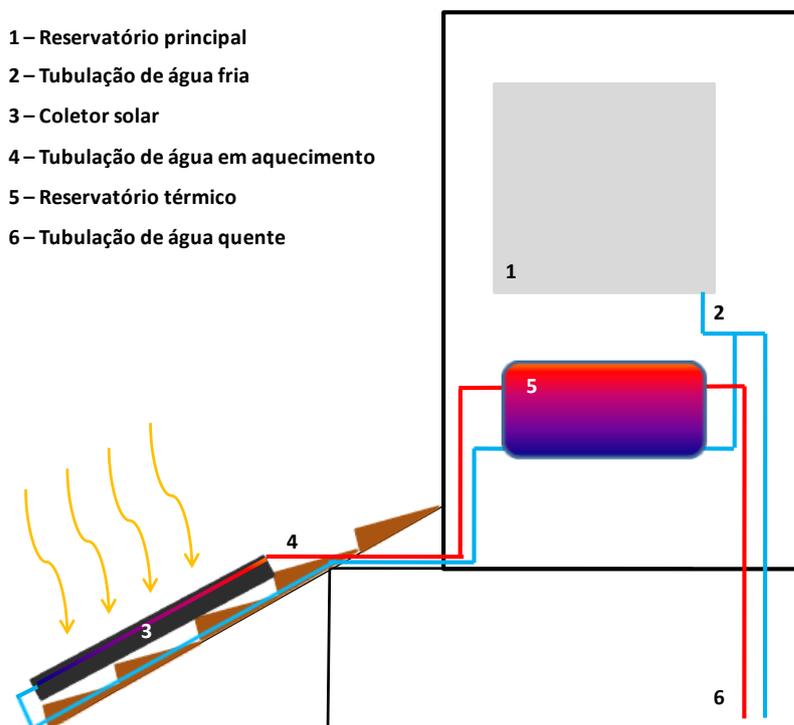


Figura 1: Componentes de um sistema de aquecimento solar

Os coletores solares utilizados para aquecimento solar de água possuem diferenças em relação à tecnologia de acordo com a aplicação. Conforme Eletrobras (2012), os coletores mais disseminados no mercado são os coletores planos com cobertura, a qual corresponde a uma caixa de isolamento transparente. Tais coletores são utilizados principalmente para aquecimento de água residencial e em estabelecimentos comerciais ou públicos, como hotéis e hospitais. A Figura 2 ilustra um exemplo de SAS com coletor plano com cobertura.

A cobertura transparente possui a função de proporcionar o efeito estufa no interior de um coletor plano, além de garantir a estanqueidade do mesmo. Raios ultravioletas incidem sobre a superfície da cobertura transparente e parte desta radiação a atravessa, incidindo sobre a superfície enegrecida, que recebe também parte da radiação absorvida pela cobertura e posteriormente transmitida na forma de calor. A superfície enegrecida emite raios infravermelhos, de comprimentos de onda maiores, que não conseguem ultrapassar a cobertura transparente, aumentando-se assim a energia térmica transferida para a água em circulação.



Figura 2: Sistema de aquecimento solar com coletor plano com cobertura

Para a instalação de coletores solares em telhados é necessário definir a orientação da placa, buscando-se aumentar a eficiência de absorção da radiação solar. No hemisfério sul os coletores devem ser orientados para o Norte geográfico. Esta orientação pode variar até 30° sem que o máximo rendimento seja significativamente comprometido, conforme a NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e Instalação. Também influencia no rendimento o ângulo de inclinação dos coletores em relação ao plano horizontal, que varia conforme a latitude em que está localizada a instalação e o período do ano em que é necessária maior energia térmica para se alcançar temperaturas de água desejadas. Porém, na prática, a inclinação do telhado é a adotada pelo instalador por questões de facilidade, sendo possível compensar as perdas de rendimento através do aumento da área dos coletores instalados.

Os coletores planos sem cobertura são geralmente construídos com material polimérico e aplicados para aquecimento solar da água de piscinas, e possuem o mesmo princípio de funcionamento daqueles com cobertura, assim como os coletores de tubo a vácuo. Nestes, os materiais coletores do calor proveniente dos raios solares são dispostos no interior de tubos de vidro, onde ocorre a troca de calor com a água. Na maioria dos modelos, obtém-se aquecimento a maiores temperaturas do que em coletores planos, sendo aplicados geralmente para aquecimento de água e geração de vapor no setor industrial (ELETROBRAS, 2012). A Figura 3 ilustra um coletor plano sem cobertura, enquanto a Figura 4 ilustra um exemplo de coletor de tubo a vácuo. As fontes da Figura 3 e da Figura 4 correspondem, respectivamente, aos sítios eletrônicos da *HELIOTEK BOSCH GROUP* e da *JAMP ENERGIA LIMPA*.



Figura 3: Coletor solar plano sem cobertura



Figura 4: Coletor solar de tubo a vácuo

2.3 ASPECTOS DOS MERCADOS MUNDIAL E NACIONAL

Apesar da utilização dos aquecedores solares de água ocorrer em pequena escala já na década de 70, foi na década de 90 que houve grande crescimento da adoção por usuários. Segundo Eletrobras (2012), em 2009 a área total de coletores instalados no mundo era da ordem de 246,3 milhões de metros quadrados. Em conversão para unidade de potência elétrica gerada, feita pela *International Energy Agency* (IEA) para ser possível a comparação com outras fontes de energia, adotando-se como fator de conversão um metro quadrado equivalente a $0,7 \text{ kW}_{\text{th}}$, esta área corresponde a $172,4 \text{ GW}_{\text{th}}$.

Do total da área de coletores solares instalados no mundo em 2009, a China possuía participação de 58,9%, com capacidade instalada de $101,5 \text{ GW}_{\text{th}}$, números muito maiores do que os demais países do mundo. A Europa possuía 18,9% de participação e capacidade instalada de $32,5 \text{ GW}_{\text{th}}$, seguida por EUA e Canadá juntos com 8,7%, sendo a capacidade instalada de $15 \text{ GW}_{\text{th}}$. As Américas Central e do Sul, incluindo o Brasil, possuíam participação de 2,7%, com capacidade instalada de $4,7 \text{ GW}_{\text{th}}$. Segundo dados de 2011 da *European Solar Thermal Industry Federation*, entre 2008 e 2010 houve queda na área total de coletores solares instalados na Europa. Isto se deu devido à crise econômica mundial que ocorreu neste período, que desacelerou principalmente o mercado alemão (ELETROBRAS, 2012).

Assim como em termos mundiais, a inserção do aquecimento solar de água no Brasil teve grande expansão na década de 90. Segundo dados da Associação Brasileira de

Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), fornecidos por Eletrobras (2012), o crescimento no mercado brasileiro ocorre na ordem de 20% ao ano nos últimos anos. A área total instalada de coletores solares no país era de 5,2 milhões de metros quadrados em 2009. O Plano Estratégico Solar elaborado pelo Grupo Técnico de Energia Solar Térmica, composto por diversas instituições sob coordenação do Ministério do Meio Ambiente (MMA) prevê como uma de suas metas 15 milhões de metros quadrados de sistemas de aquecimento solar instalados no Brasil até 2015. Utilizando-se o fator de conversão adotado pela IEA, a capacidade instalada de geração de potência elétrica equivalente a esta meta é de 10,5 GW_{th}.

Informações mais recentes a respeito da utilização de aquecimento solar de água no mundo foram divulgadas em junho de 2015 pela IEA, através do relatório Aquecimento Solar no Mundo – o mercado e sua contribuição para o suporte de energia, considerando a capacidade total instalada em operação até o final de 2013. Esta corresponde a 374,7 GW_{th}, o que é equivalente a aproximadamente 535 milhões de metros quadrados de área de coletores instalados (IEA, 2015).

A Figura 5 apresenta o crescimento da área de coletores solares instalados no mundo. Em comparação aos dados referentes ao ano de 2009 já apresentados, verifica-se que o crescimento da capacidade instalada mundial nestes quatro anos corresponde a 117%.



Figura 5: Crescimento da área instalada de coletores solares no mundo de 2009 a 2013

A Figura 6 mostra a distribuição percentual da área de coletores instalados em 2013 em países ou regiões no mundo. China e Europa continuam a possuir maior parte da capacidade instalada de aquecimento solar de água mundial (82%), sendo as respectivas capacidades

instaladas de 262,3 GW_{th} (aumento de 158% de 2009 a 2013) e 44,1 GW_{th} (aumento de 36% de 2009 a 2013). O crescimento nas Américas Central e do Sul foi de 85% no período mencionado, atingindo capacidade instalada equivalente a 8,7 GW_{th}.

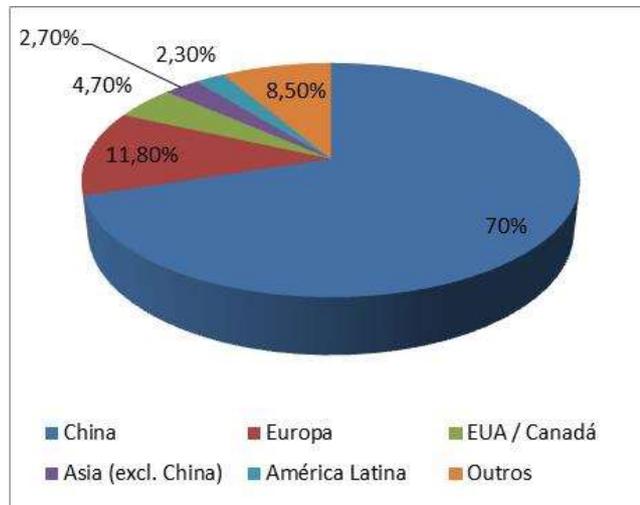


Figura 6: Participação de países ou regiões na área instalada de coletores solares em 2013

De acordo com IEA (2015), a capacidade instalada no Brasil no fim de 2013 era equivalente a 6,7 GW_{th}, com 9,6 milhões de metros quadrados de coletores instalados no país (crescimento de 84% de 2009 a 2013), conforme mostra a Figura 7. Assim, o Brasil ocupa a 5ª posição no *ranking* mundial de capacidade instalada de coletores solares para aquecimento de água, atrás apenas da China, EUA, Alemanha e Turquia.

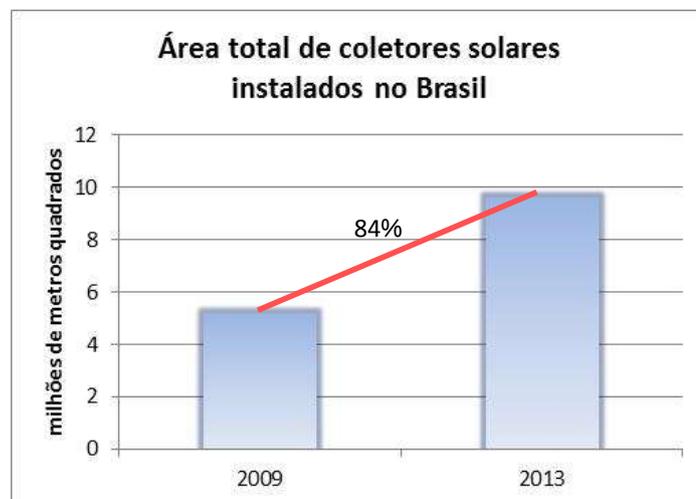


Figura 7: Crescimento da área instalada de coletores solares no Brasil de 2009 a 2013

Com relação ao Plano Estratégico Solar, não há ainda informações a respeito do alcance da meta de 15 milhões de metros quadrados de coletores solares instalados. De acordo com a ABRAVA, em 2014 a área de coletores solares instalados no Brasil chegou a 11,2 milhões de m², sendo o crescimento de 2013 a 2014 de aproximadamente 17%. Adotando-se este crescimento para 2015, haveria no Brasil ao final deste ano cerca de 13,1 milhões de metros quadrados de coletores solares, não atingindo assim a meta estabelecida, sendo, porém tal valor significativo em relação à capacidade instalada no ano de realização do Plano.

2.4 AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO BRASILEIRO E EM PROGRAMAS DE GOVERNO

A eficiência energética está contemplada entre diretrizes de longo prazo no planejamento energético brasileiro. O Plano Nacional de Energia 2030 – PNE2030 (MME, 2008 – b) estabeleceu metas de redução da demanda de energia elétrica a partir de eficiência energética no setor elétrico. No caso do chamado progresso autônomo, em que a iniciativa parte somente do mercado, considerou-se previsão de 5% de redução. Este mesmo percentual foi estabelecido como meta para o denominado progresso induzido, em que há estímulos através de políticas públicas. O mesmo plano prevê a promoção da redução de 10% do consumo final de energia elétrica a partir de Ação de Eficiência Energética.

Com relação ao planejamento de longo prazo envolvendo aquecimento solar de água, o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) apresentou algumas projeções relacionadas. Primeiramente, a Figura 8 apresenta a projeção da curva de consumo de energia elétrica do setor residencial e especificamente de chuveiros elétricos até 2030, com destaque para o aumento de aproximadamente 192% deste último ao longo do horizonte, alcançando o valor de 56,8 TWh/ano. Estimou-se a partir destes dados demanda no horário de ponta referente a 6.500 MW em 2030.

A Figura 9, retirada do PNEf apresenta a curva projetada de penetração dos sistemas de aquecimento solar de água ao longo do horizonte até 2030, em termos de área de coletores instalados e número de residências atendidas. Estimou-se que aproximadamente 5 milhões de residências brasileiras utilizarão sistemas de aquecimento solar de água em 2030, totalizando 22,9 milhões de metros quadrados de placas coletoras, aproximadamente.

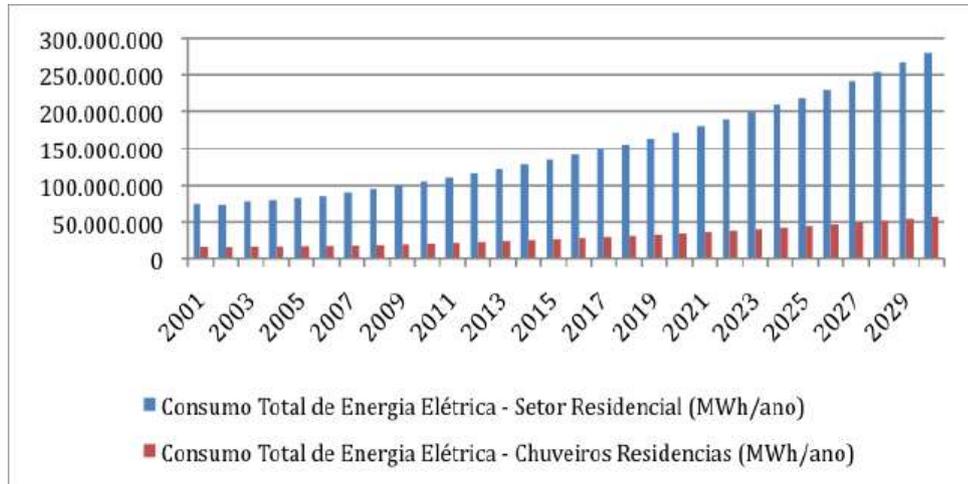


Figura 8: Projeção do consumo de energia elétrica residencial e dos chuveiros elétricos de uso doméstico

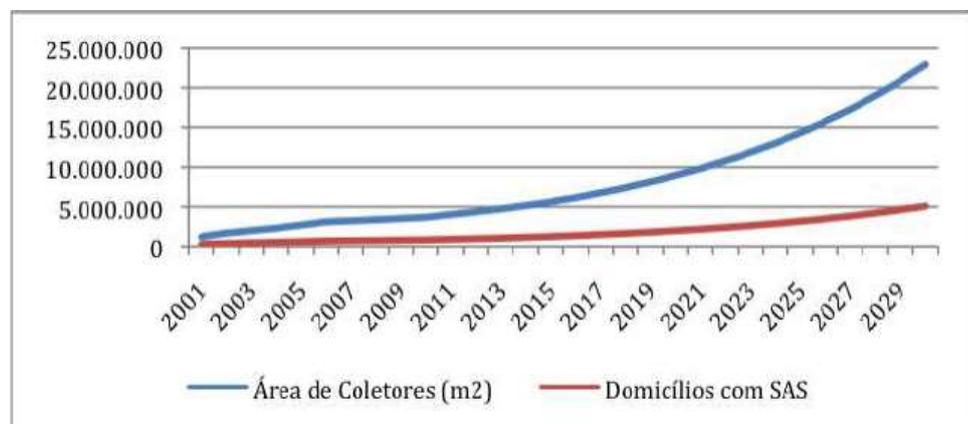


Figura 9: Projeção da penetração de sistemas de aquecimento solar no setor residencial até 2030

A Figura 10 apresenta a curva de economia anual de energia elétrica a partir da inserção do aquecimento solar residencial ao longo do horizonte até 2030. Esta economia prevista é de 2,2 TWh/ano em 2030, sendo o potencial de retirada de demanda de energia elétrica no horário de ponta de 1.250 MW (MME, 2011 – a).

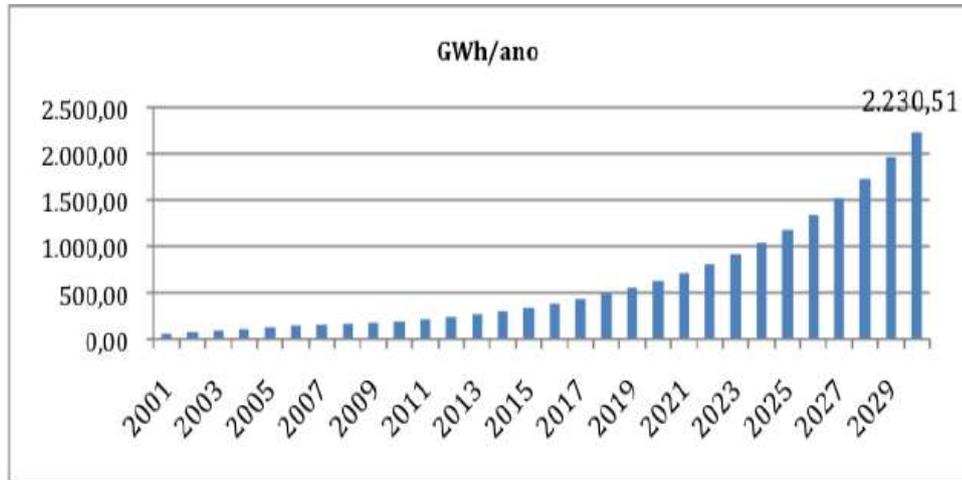


Figura 10: Projeção da economia de energia com a utilização de sistemas de aquecimento solar de água

Iniciativas de fundamental importância para a aceitação do aquecimento solar de água residencial no Brasil foram a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) Solar e a concessão do Selo Procel Eletrobrás para coletores solares e reservatórios térmicos fabricados ou comercializados no Brasil, ambas em parceria entre o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), da ELETROBRAS.

O PBE Solar é um programa de avaliação da conformidade de caráter compulsório, com foco na eficiência energética, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem, coordenado pelo INMETRO com apoio técnico e institucional da ELETROBRAS PROCEL, que promove a disponibilização de informações úteis sobre o desempenho energético dos equipamentos, de forma a influenciar a decisão de compra dos consumidores. Estas informações estão contidas na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE, sendo o equipamento classificado por níveis de eficiência energética que variam de A a E, em sentido decrescente de eficiência, utilizando faixas coloridas para facilitar a diferenciação. Ensaios de verificação inicial e de manutenção são realizados para avaliação das características declaradas na ENCE (ELETROBRAS, 2012).

O Selo Procel Eletrobras tem sua concessão de caráter voluntário, tendo como objetivo estimular a fabricação e comercialização de coletores solares e reservatórios térmicos de maior eficiência energética. Assim como a ENCE, o Selo Procel Eletrobrás estimula a compra por consumidores de equipamentos mais eficientes, o que, entre outros benefícios, reduz os impactos ambientais relacionados ao uso final de energia elétrica (ELETROBRAS, 2012).

2.5 CONCLUSÃO

Através dos assuntos abordados neste capítulo, é possível concluir que os mercados mundial e nacional de SAS vêm crescendo nos últimos anos. No Brasil, conforme os benefícios da utilização do aquecimento solar de água são difundidos, somados aos programas de governo que impulsionam a utilização desta solução em unidades habitacionais de famílias de baixa renda, verifica-se um cenário otimista para a continuidade do crescimento da utilização de aquecimento solar de água.

3 CAPÍTULO III – PROCEDIMENTOS PARA A OBTENÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE DEMANDA DE PONTA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as etapas da metodologia de obtenção da economia de energia e da redução na demanda de ponta a partir de Medição e Verificação (M&V) estabelecidas pelo Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP), levando-se em conta as adaptações do procedimento proposto.

Apresenta-se também a modelagem estocástica aplicada à simulação computacional realizada para a geração de cenários futuros da economia de energia elétrica resultante de Projeto de Eficiência Energética (PEE) envolvendo aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda.

3.2 VERIFICAÇÃO DE ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE DEMANDA DE PONTA COM PEE A PARTIR DE PROCEDIMENTO ADAPTADO DO PIMVP

O estudo feito por Kaiser e Pulsipher (2010) mostra que os critérios do PIMVP quando aplicados ao setor residencial devem ser bem definidos, considerando-se a realidade do programa de eficiência energética, o que vem ao encontro das dificuldades levantadas pelas distribuidoras de energia elétrica brasileiras em utilizar os critérios do PIMVP para M&V em PEE, incluindo aqueles cuja Ação de Eficiência Energética (AEE) envolve aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda. Neste contexto, a ABRADÉE, contando com consultorias e parcerias de instituições como ICF Consultoria do Brasil Ltda., Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (Agência Alemã de Cooperação Técnica Internacional), coordenou o desenvolvimento de procedimentos de M&V adaptados do PIMVP em PEE por uso final.

Desta forma, foram definidas metodologias adaptadas de M&V por uso final, levando-se em conta o erro, custos de M&V, custo total do PEE e da energia economizada. Estas metodologias foram aprovadas pela ANEEL e tornadas obrigatórias através de documentos com diferentes graus de detalhamento e especificação, dos quais destacam-se, para utilização nos estudos de caso deste trabalho:

- Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE): aprovado pela Resolução Normativa 556/2013 da ANEEL, estabelece instruções para todas as etapas dos PEE de distribuidoras de energia elétrica (ANEEL, 2014 – b);
- Guia de Medição e Verificação para o Programa de Eficiência Energética Regulado pela ANEEL: detalha, padroniza e facilita a aplicação das metodologias de M&V nos PEE de distribuidoras de energia elétrica;
- Planos de M&V por uso final: estabelece definições para M&V e elaboração do Plano de M&V e demais documentos para cada uso final, como o Plano de M&V para Aquecimento de Água em Baixa Renda.

É importante destacar que, de acordo com EVO (2012) as atividades de M&V seguem os seguintes princípios:

- completude: considerar todos os efeitos de um projeto na economia, quantificando os efeitos significativos através da medição e estimando os demais;
- conservadorismo: avaliar economia por valores mais baixos quando quantificações são incertas;
- consistência: entre diferentes projetos de eficiência energética, diferentes profissionais, diferentes tempos de um mesmo projeto e entre projetos de eficiência energética e de nova energia;
- precisão: relatórios com resultados tão precisos quanto possível, de acordo com o orçamento das atividades de M&V;
- relevância: parâmetros de performance de maior importância ou menos conhecidos devem ser medidos, podendo os demais serem estimados;
- transparência: atividades de M&V devem ser claras e divulgadas.

A metodologia de cálculos estabelecida pelo PIMVP prevê que, primeiramente, é necessário definir a amostragem para realizar a M&V. As amostras devem ser homogêneas, para se reduzir variabilidade das medições e incerteza resultante. Para isso, caso seja possível, as residências do conjunto habitacional devem ser separadas em “sistemas”, buscando-se agrupar residências com base em critérios como a proximidade de número de moradores e renda familiar.

De acordo com ANEEL (2014 – a) e ANEEL (2014 – b), a metodologia de definição do número de amostras consiste em duas estimativas iniciais, uma determinada de acordo com a relação entre população e número de amostras inicial dada pela NBR 5426 - Planos de Amostragem e Procedimentos na Inspeção por Atributos, considerando-se regime de inspeção severa (nível 1), e a segunda calculada a partir da Expressão 3.1 e da Expressão 3.2 apresentadas a seguir:

$$n_0 = \frac{st_{\infty}^2 \cdot cv^2}{e^2} \quad (3.1)$$

$$n = \frac{n_0 \cdot N}{n_0 + N} \quad (3.2)$$

onde,

- n_0 consiste no número inicial de amostras;
- st_{∞} representa o valor padrão de distribuição normal conforme “Tabela-t” disponível no PIMVP (nível de confiança), devendo-se adotar o valor de 1,96, equivalente a 95% de confiança;
- cv é o coeficiente de variação, devendo-se adotar o valor oriundo de projeto anterior ou, sendo inexistente, o valor de 0,5;
- e corresponde ao nível de precisão, devendo-se adotar o valor de 0,1 (10% de precisão);
- n é o número de amostras ajustado para pequenas populações;
- N é o tamanho da população.

As estimativas obtidas através dos dois métodos mencionados fornecem uma base para a decisão sobre a amostragem inicial, considerando-se restrições de equipamentos, pessoas, custo e tempo.

Após obtenção dos valores medidos no período de linha de base, deve-se calcular a precisão obtida para a amostragem, para cada parâmetro-chave. Este cálculo é feito através da Expressão 3.1, utilizando-se coeficiente de variação calculado com os dados obtidos, conforme Expressão 3.3. Caso a precisão de 10% não for atingida (for maior que este valor), deve-se aumentar o número de amostras, realizando-se assim processo iterativo até atingir a precisão desejada (ANEEL, 2014 – a).

$$cv_r = \frac{s}{\bar{y}} \quad (3.3)$$

onde,

- cv_r representa o coeficiente de variação real;
- s corresponde ao desvio padrão, a partir dos valores do parâmetro-chave medido;
- \bar{y} é a média aritmética dos valores do parâmetro-chave.

Através das expressões 3.4 e 3.5 obtêm-se o desvio padrão e a média aritmética simples dos valores do parâmetro-chave medido, respectivamente.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (3.4)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3.5)$$

onde,

- y_i corresponde ao valor do parâmetro-chave.

Uma vez obtidas medições dos parâmetros-chave – que correspondem às variáveis responsáveis pelo consumo de energia elétrica – no período de linha de base com nível de precisão da amostragem adequado, e obtidos os valores da variável independente – variável que pode influenciar o consumo de energia elétrica mas não é responsável pelo mesmo, verifica-se se há correlação entre parâmetro(s) e variável independente, através de análise de regressão linear.

O primeiro critério de avaliação verificado é o Coeficiente de Determinação (R^2), calculado através da Expressão 3.6 (EVO, 2012).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.6)$$

onde,

- \hat{y}_i é o valor do parâmetro-chave ajustado pelo modelo para dado ponto usando o valor da variável independente correspondente.

O segundo critério de avaliação é o Coeficiente de Variação do Erro Médio Quadrático – $CV(EMQ)$, que mede a exatidão da previsão. O cálculo deste se dá através da Expressão 3.7, dividindo-se o erro padrão da estimativa pela média da energia consumida (EVO, 2012):

$$CV(EMQ) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-p-1}}}{\bar{y}} \quad (3.7)$$

onde,

- p é o número de variáveis independentes.

O último critério de avaliação é a *Distribuição-t*, um teste estatístico para determinar se uma estimativa tem importância estatística, devido à possibilidade de variação dos coeficientes de regressão. A *Distribuição-t* é calculada através da Expressão 3.8, dividindo-se o coeficiente de regressão (declividade) pelo erro padrão de cada coeficiente do modelo de regressão (EVO, 2012):

$$Distribuição - t = \frac{b}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-2)}}} \quad (3.8)$$

onde,

- b representa o coeficiente de regressão (para o aumento de 1 unidade da variável independente há aumento de “ b ” unidades do parâmetro-chave);
- x_i corresponde ao valor da variável independente;
- \bar{x} é a média aritmética dos valores da variável independente.

De acordo com o Plano de M&V para Aquecimento de Água em Baixa Renda, adotando-se os critérios do caso repassado às distribuidoras de energia elétrica como exemplo, para haver correlação entre parâmetro(s) chave(s) e a variável independente, é necessário que pelo menos dois dos três critérios seguintes sejam atendidos (ANEEL, 2014 – c):

- R^2 maior que 0,75;
- $CV(EMQ)$ menor que 5%;
- *Distribuição-t* maior que 2.

Caso seja verificada correlação, a regressão é validada e utilizada como base de ajuste para os períodos de linha de base e de verificação da economia, para nivelamento do consumo de energia na fronteira de medição, sem influência da variável independente. Desta forma, o cálculo da economia de energia é realizado através da Expressão 3.9 (ANEEL, 2014 – c).

$$EE = C_{lb} - C_{de} \quad (3.9)$$

onde,

- EE corresponde à economia de energia elétrica;
- C_{lb} é o consumo no período de linha da base ajustado às condições fixas;
- C_{de} representa o consumo no período de determinação da economia ajustado às condições fixas.

Caso não haja correlação, a Expressão 3.9 é utilizada, sem necessidade de correções.

O cálculo da redução da demanda de energia elétrica no horário de ponta não requer ajustes e é realizado através da Expressão 3.10 (ANEEL, 2014 – c).

$$RD = D_{lb} - D_{de} \quad (3.10)$$

onde,

- RD corresponde à redução de demanda no horário de ponta;
- D_{lb} representa a demanda de ponta média no período de linha de base;
- D_{de} é a demanda de ponta média no período de determinação da economia.

Para que haja confiança nos resultados de economia de energia e redução de demanda de ponta a partir de M&V é necessário que haja níveis de incerteza razoáveis referentes a estes resultados, conforme preconiza o PIMVP. Dada a incapacidade de se obter o valor exato de um resultado, a incerteza expressa uma faixa de valores dentro da qual o valor exato se encontra, ou seja, tem-se uma estimativa com certo nível de incerteza. Esta incapacidade se dá devido ao fato de atividades de amostragem, medição e modelagem conterem erros aleatórios e sistemáticos. Os primeiros se referem à variabilidade natural dos processos e devem ser abordados com métodos estatísticos, enquanto os erros sistemáticos se referem à tendência que se observa entre os valores (viés dos dados), conforme Cabral (2004).

A incerteza relacionada ao processo de M&V contempla erros de amostragem, de medição e de modelagem. Erros de amostragem estão relacionados à aleatoriedade da

representação da população por uma amostra, além da adoção de abordagem que leve ao erro sistemático. Devem ser contempladas tanto no cálculo da incerteza da economia de energia elétrica como da redução de demanda de ponta.

Erros de modelagem estão relacionados à forma inadequada de modelagem matemática, utilização de variáveis irrelevantes ou não utilização de variáveis relevantes, e devem ser contemplados no cálculo da incerteza da economia de energia elétrica, caso haja correlação entre parâmetro-chave e variável independente, não sendo necessária sua consideração para cálculo da incerteza da redução de demanda de ponta.

Erros de medição podem resultar da precisão de medição do equipamento, de desvios em relação à calibração e das técnicas de medição, por exemplo, e devem ser contemplados no cálculo da incerteza da economia de energia elétrica e da redução de demanda de ponta.

Também existem incertezas não quantificáveis ou com origem dos erros desconhecida, sendo exemplos destas a má instalação do medidor e estimativas imprecisas da Opção A, uma das quatro opções de M&V fornecidas pelo PIMVP. Estas formas de incerteza apenas podem ser controladas através de adoção de melhores práticas.

De acordo com EVO (2012), a incerteza é representada pelas expressões 3.11 e 3.12, conforme utilização da precisão absoluta – calculada pela Expressão 3.13 – ou precisão relativa – calculada pela Expressão 3.14, respectivamente.

$$I_a = \bar{y} \pm P_a \quad (3.11)$$

$$I_r = \bar{y} \pm P_r \quad (3.12)$$

$$P_a = st. EP \quad (3.13)$$

$$P_r = \frac{P_a}{\bar{y}} \quad (3.14)$$

onde,

- I_a é a faixa que representa a incerteza absoluta relacionada ao parâmetro-chave medido;
- P_a corresponde à precisão absoluta do parâmetro-chave medido;
- I_r é a faixa que representa a incerteza relativa relacionada ao parâmetro-chave medido;
- P_r corresponde à precisão relativa do parâmetro-chave medido;

- st é o valor obtido a partir da “Tabela-t” disponível no PIMVP, para nível de confiança de 95% e $n-1$ graus de liberdade;
- EP representa o erro padrão do parâmetro-chave medido.

O erro padrão é obtido de formas diferentes de acordo com a causa dos erros. No caso de erros de amostragem, o erro padrão é calculado através da Expressão 3.15 (EVO, 2012).

$$EP_a = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.15)$$

onde,

- EP_a é o erro padrão da amostragem.

A obtenção do erro padrão referente ao processo de modelagem ocorre através da Expressão 3.16 (EVO, 2012).

$$EP_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n - 2)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (3.16)$$

onde,

- EP_r é o erro padrão do modelo de regressão linear.

O erro padrão de medição é obtido através da Expressão 3.17 (EVO, 2012).

$$EP_m = p_m \cdot \bar{y} \quad (3.17)$$

onde,

- EP_m é o erro padrão de medição;
- p_m representa a precisão do medidor de energia, em percentual da leitura corrente.

Uma vez obtidas as incertezas de amostragem, de modelagem e de medição, é possível combiná-las a fim de se obter a incerteza total da economia de energia ou da redução de demanda de ponta. De acordo com o EVO (2012), esta combinação pode ser realizada através da Expressão 3.18, uma vez que os componentes são independentes, ou seja, os erros aleatórios de um não afetam os outros, e que a economia de energia e a redução da demanda de ponta são calculadas através de subtração dos respectivos valores no período de linha de base e de determinação da economia.

$$EP_c = \sqrt{EP_a^2 + EP_r^2 + EP_m^2} \quad (3.18)$$

onde,

- EP_c corresponde ao erro padrão combinado.

Como já mencionado, o erro padrão do modelo de regressão linear só é contemplado para cálculo do erro padrão combinado do consumo evitado de energia elétrica. Através das expressões 3.13 e 3.14, obtêm-se as precisões absoluta e relativa para o erro padrão combinado, e com estas obtêm-se a incerteza total absoluta e incerteza total relativa – expressões 3.11 e 3.12 respectivamente – relacionadas aos valores de energia elétrica evitada e de demanda de ponta reduzida.

3.3 OBTENÇÃO DE CENÁRIOS DE ECONOMIA DE ENERGIA RESULTANTE DE PEE

Uma vez que ganhos obtidos com eficiência energética são contemplados nos planejamentos energéticos de longo prazo no Brasil, busca-se avaliar a possibilidade de se obter projeção de cenários futuros da economia de energia elétrica resultante de Projeto de Eficiência Energética cuja AEE é o aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda, a partir de modelagem estocástica e simulação computacional.

Vários processos estocásticos têm sido utilizados no Mercado Elétrico Brasileiro para modelar as incertezas presentes no mesmo, tais como preço à vista, afluência dos reservatórios, demanda elétrica e consumo de energia elétrica. Estas variáveis aleatórias podem ser modeladas como séries temporais, através da Técnica de Simulação de Monte Carlo, associada ao processo estocástico denominado *Random Walk*.

Como a economia de energia elétrica anual obtida a partir da AEE de um PEE é dependente de fatores que influenciam o consumo de energia elétrica, tais como o número de residentes, hábitos de banho e renda familiar, que são variáveis que apresentam características aleatórias, busca-se avaliar a possibilidade de se obter projeção de cenários futuros da economia anual de energia elétrica, sendo esta a variável aleatória a ser modelada conforme processo estocástico adequado.

Segundo MORETTIN e TOLOI (1987):

Seja T um conjunto arbitrário. Um processo estocástico é uma família $Z = \{Z(t), t \in T\}$, tal que, para cada $t \in T$, $Z(t)$ é uma variável aleatória.

De acordo com Domingues (2003), a obtenção de séries temporais sintéticas pode ocorrer através do processo estocástico chamado passeio aleatório (*Random Walk*). Este parte do Processo Estocástico de Wiener.

Segundo Domingues (2003) e Braumann (2005), o processo de Wiener é um processo estocástico de tempo contínuo com as seguintes propriedades:

- a distribuição de probabilidades para valores futuros depende somente do valor atual da variável aleatória (o processo de Wiener é um processo de Markov);
- a distribuição de probabilidades em qualquer intervalo de tempo é independente das distribuições em outros intervalos (os incrementos são independentes);
- os incrementos têm distribuição normal com média igual a zero e variância igual a um por unidade de tempo.

Logo, em um processo de Wiener, o incremento Δz na variável aleatória z em um intervalo de tempo Δt é dado pela Expressão 3.19:

$$\Delta z = \varphi \cdot \sqrt{\Delta t} \quad (3.19)$$

onde,

- φ é a variável randômica com distribuição normal padronizada – $N(0,1)$.

Assim, o processo básico de Wiener possui taxa de *drift* – tendência de crescimento – de zero por unidade de tempo, ou seja, o valor esperado da variável aleatória em qualquer instante de tempo futuro é o valor corrente. Como a variância cresce a taxa de um por unidade

de tempo, o processo de Wiener é considerado um processo estocástico não estacionário (Domingues, 2003).

O Processo Estocástico de Wiener Generalizado possui uma taxa de *drift* de μ por unidade de tempo, sendo desta forma também chamado de Movimento Browniano com *drift*. É representado pela Expressão 3.20 (Domingues, 2003):

$$da = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dz \quad (3.20)$$

onde,

- a representa a variável aleatória que segue Processo Estocástico de Wiener Generalizado;
- μ corresponde à constante que representa a tendência da série temporal;
- σ é a constante que representa a volatilidade do passeio aleatório (ruído branco).

A Expressão 3.21 representa a mudança no valor da variável aleatória a em um pequeno intervalo de tempo Δt . Verifica-se que Δa terá uma distribuição normal – $N(\mu, \sigma)$, ou seja, o Processo Estocástico de Wiener Generalizado possui taxa de tendência de μ e taxa de variância de σ^2 .

$$\Delta a = \mu \cdot \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t} \quad (3.21)$$

O Processo de Itô corresponde à generalização do Movimento Browniano com *drift*, em que as constantes μ e σ passam a ser funções da variável aleatória a e do instante de tempo t . O Processo de Itô é dado pela Expressão 3.22 (Domingues, 2003):

$$da = \mu(a, t) \cdot dt + \sigma(a, t) \cdot dz \quad (3.22)$$

onde,

- $\mu(a, t)$ corresponde à função não aleatória conhecida que representa o *drift* esperado instantâneo;
- $\sigma(a, t)$ corresponde à função não aleatória conhecida que representa a variância instantânea.

De acordo com Domingues (2003), o Movimento Geométrico Browniano (MGB) é um caso particular do Processo de Itô, em que:

- $\mu(a, t) = \mu \cdot a$
- $\sigma(a, t) = \sigma \cdot a$

Desta forma, as expressões 3.23 e 3.24 representam o MGB. Através destas equações, modelando-se para os casos específicos, obtém-se o passeio aleatório que dá origem às séries temporais sintéticas.

$$da = \mu \cdot a \cdot dt + \sigma \cdot a \cdot dz \quad (3.23)$$

$$\frac{da}{a} = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dz \quad (3.24)$$

De acordo com Fonseca (2006), a Expressão 3.25 representa o processo de Itô utilizado como método de precificação de derivativos no mercado financeiro, para uma função $F(a, t)$ diferenciável no mínimo duas vezes em a e uma vez em t . Esta expressão será aplicada ao estudo aqui apresentado, dado que a modelagem estocástica é a mesma.

$$dF = \left[\frac{\partial F}{\partial t} + \mu(a, t) \cdot \frac{\partial F}{\partial a} + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2(a, t) \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial a^2} \right] \cdot dt + \sigma(a, t) \cdot \frac{\partial F}{\partial a} \cdot dz \quad (3.25)$$

Ainda segundo Fonseca (2006), enquanto considera-se que o comportamento de uma variável aleatória siga um processo de Markov e tenha incrementos independentes, não se deve assumir que as variações desta variável aleatória sigam uma distribuição normal, se esta variável não puder ter valor inferior a zero. Neste caso, pode-se assumir que a variável aleatória siga uma distribuição log-normal, ou seja, as variações no logaritmo da variável aleatória seguem uma distribuição normal.

No Apêndice A é apresentado desenvolvimento matemático para se obter a expressão utilizada como modelagem estocástica do MGB com reversão para a média referente à variável aleatória a . De acordo com Domingues (2003), quando uma variável aleatória segue um MGB, seus valores tendem a divergir do ponto de partida original, uma vez que a variância cresce linearmente com o tempo. Neste contexto, o processo de reversão para a média – Processo de Ornstein-Uhlenbeck – força os valores obtidos para a variável aleatória

ao longo do tempo a reverterem para a posição de equilíbrio, ou seja, para o valor médio. Fonseca (2006) menciona a existência de uma força de reversão que atua na variável aleatória, puxando-a para um patamar de equilíbrio de longo prazo. Esta ocorre a determinada velocidade de reversão, representada pelo parâmetro η .

Primeiramente, tem-se a Expressão 3.26, que representa a versão discreta da expressão do MGB. Verifica-se que o MGB segue uma distribuição normal, dentro de um intervalo T , com média $(\mu - \frac{1}{2} \cdot \sigma^2) \cdot T$ e variância $\sigma^2 \cdot T$.

$$a_{t+1} = a_t \cdot e^{[(\mu - \frac{1}{2} \sigma^2) \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t}]} \quad (3.26)$$

A Expressão 3.27 representa a modelagem estocástica de reversão para a média:

$$a_{t+1} = a_t \cdot e^{\{\eta \cdot (\ln \bar{a} - \ln a_t) - \frac{1}{2} \sigma^2\} \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t}} \quad (3.27)$$

De acordo com Domingues (2003), a variação esperada para a variável aleatória depende da diferença entre seu valor em determinado instante de tempo e o valor médio. Logo, se neste determinado instante de tempo o valor da variável aleatória a for maior do que a média \bar{a} , é mais provável uma queda no valor de a no próximo instante de tempo Δt , ocorrendo o inverso se a for menor que o valor médio. Desta forma, ocorre o processo de reversão para a média em um MGB.

A economia de energia elétrica resultante de PEE como variável aleatória pode ser obtida a partir da Expressão 3.28, a qual representa a modelagem estocástica utilizada na simulação das séries temporais sintéticas.

$$EE_{t+1} = EE_t \cdot e^{\{\eta \cdot (\ln \bar{EE} - \ln EE_t) - \frac{1}{2} \sigma^2\} \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t}} \quad (3.28)$$

O passeio aleatório é obtido a partir da técnica de simulação de Monte Carlo. Segundo Fonseca (2006), esta possui aplicação na solução de problemas matemáticos através de experimentos computacionais em áreas do conhecimento como a financeira – em precificação de opções e análise de risco, comercial/industrial – em simulação do comportamento de filas, entre outras. Pode ser aplicado em problemas determinísticos ou probabilísticos, de diversos

níveis de complexidade, mas necessita de grande número de simulações para reduzir o erro da estimativa da solução a ser obtida, o que pode resultar em lentidão na simulação.

Os passos que compõem a simulação de Monte Carlo são (DOMINGUES, 2003):

- obtenção do valor médio e do desvio padrão da variável aleatória a partir do histórico de valores;
- adoção do valor inicial da variável aleatória, que será o valor referente ao tempo zero;
- adoção do período de análise e o intervalo de tempo entre as previsões, na mesma unidade de tempo;
- sorteio de números aleatórios convertidos em números com distribuição normal padronizada, através de ferramenta computacional. Estes são aplicados ao parâmetro φ ;
- aplicação de um passo do passeio aleatório ao processo, dado que são conhecidos os demais parâmetros e variáveis componentes da expressão de modelagem estocástica;
- repetição dos passos do passeio aleatório para os valores da variável aleatória com distribuição normal padronizada obtidos para cada instante de tempo ao longo do período de simulação.

Pode-se então repetir a simulação das séries temporais até se obter distribuição probabilística dos resultados estatisticamente válida, ou seja, que represente o comportamento estocástico esperado para a variável aleatória.

O comportamento estocástico da variável aleatória pode ser representado através das curvas contendo os valores obtidos para economia anual de energia elétrica no horizonte de tempo definido, como uma família de séries temporais, a partir da simulação de Monte Carlo. O processo estocástico pode também ser representado pela evolução da função densidade de probabilidade (FDP) de uma variável aleatória no tempo (DOMINGUES, 2003). Uma função densidade de probabilidade contínua é formada por limites de uma infinita sequência de distribuições discretas, cujas variáveis formam um conjunto enumerável de valores (ANDERSON, SWEENEY e WILLIAMS, 2008).

3.4 CONCLUSÃO

A metodologia de obtenção da economia de energia e da redução na demanda de ponta a partir de M&V estabelecidas pelo PIMVP, levando-se em conta as adaptações dos procedimentos utilizados tem aplicação recente no Brasil, o que proporciona o levantamento de oportunidades de melhoria para aprimoramento, conforme ocorre sua utilização em PEE das concessionárias de energia elétrica.

A metodologia referente à modelagem estocástica para a obtenção de cenários futuros de variáveis aleatórias por sua vez já vem sendo utilizada em diferentes áreas de conhecimento. Sua adaptação para a variável aleatória Economia Anual de Energia Elétrica resultante de PEE permite que sejam simulados cenários futuros desta variável aleatória através de processos estocásticos adequados, associados à técnica de simulação de Monte Carlo.

4 CAPÍTULO IV – ESTUDOS DE CASOS: RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de obtenção da economia de energia e da redução na demanda de ponta a partir de Medição e Verificação (M&V), conforme procedimento adaptado do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP). Antes, são feitas as definições essenciais estabelecidas pela metodologia e apresentados os estudos de caso que possibilitaram sua aplicação e consequente obtenção dos resultados. Considerações a respeito da aplicação do procedimento também estão presentes neste capítulo.

Com relação à obtenção de cenários futuros da economia de energia elétrica resultante de Projeto de Eficiência Energética (PEE), obtêm-se como resultados o passeio aleatório resultante da simulação das séries temporais, assim como a Função de Densidade de Probabilidade obtida para cada ano do horizonte da simulação. Uma vez que não há dados históricos disponíveis para valoração do desvio padrão que representa a volatilidade do passeio aleatório e da velocidade de reversão para a média da variável aleatória Economia Anual de Energia Elétrica resultante de PEE, é realizada análise de sensibilidade no intuito de verificar como a economia de energia é afetada por tais parâmetros.

4.2 VERIFICAÇÃO DE ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE DEMANDA DE PONTA COM PEE A PARTIR DE PROCEDIMENTO ADAPTADO DO PIMVP

4.2.1 Definições para estudos de caso e aplicação do procedimento de M&V

A aplicação do procedimento que abrange a metodologia definida para M&V de economia energética e redução da demanda no horário de ponta em Ação de Eficiência Energética (AEE) envolvendo aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda ocorreu através dos seguintes estudos de caso definidos junto à CELG D, a partir do PEE cadastrado no Sistema de Gestão do PEE – sistema gerenciado pela ANEEL – sob número 883, o qual envolve a instalação de 5.632 aquecedores solares para aquecimento de água em substituição ao chuveiro elétrico e 11.264 lâmpadas FLC 15W em substituição a lâmpadas incandescentes de 60W no estado de Goiás:

- Residencial Orlando de Moraes, localizado no município de Goiânia-GO: PEE em andamento na época de desenvolvimento deste estudo, sendo possível realizar medições em período próximo à instalação dos sistemas de aquecimento solar. Obtida a partir do *software* Google Earth, a Figura 11 ilustra a localização e limites do Setor Orlando de Moraes, tendo o Aeroporto Santa Geneveva e a rodovia GO-462 como referências;
- Residencial Real Conquista, localizado no município de Goiânia-GO: utilizadas medições realizadas neste PEE no ano de 2010. A Figura 12 mostra a localização do Residencial Real Conquista, na região sudoeste de Goiânia;
- Município de Itumbiara: utilizadas medições realizadas no ano de 2008. O PEE engloba os conjuntos habitacionais Alcides Rodrigues, Dona Sinica, Juca Arantes, Olintha e Morada dos Sonhos, todos situados em Itumbiara-GO.

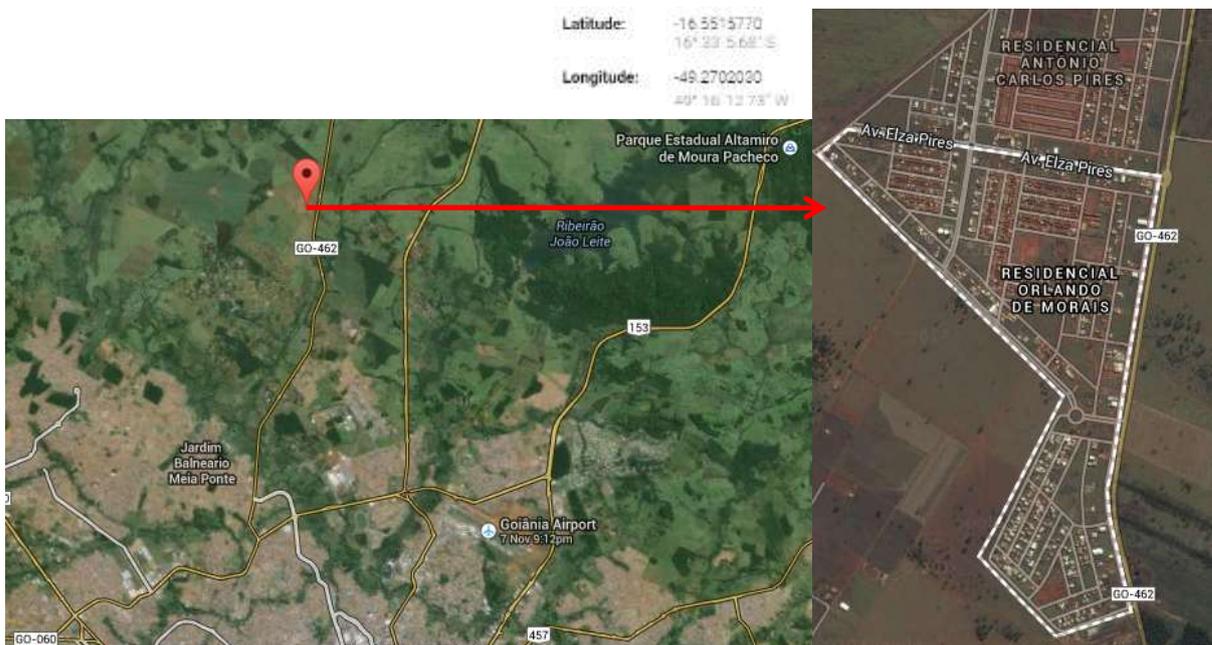


Figura 11: Localização do Setor Orlando de Moraes



Figura 12: Localização do Residencial Real Conquista

Inicialmente, é necessário realizar algumas definições referentes à AEE, como estabelece o PIMVP. A fronteira de medição corresponde aos limites dentro dos quais se deseja verificar a economia de energia e a redução de demanda de ponta. Dependendo da AEE, a fronteira de medição pode ser a instalação toda ou apenas equipamento(s) ou sistema(s) responsáveis pela AEE (EVO, 2012). Esta é definida como o conjunto de circuitos de alimentação dos chuveiros e dos resistores, ou seja, o equipamento de medição utilizado deve ser capaz de medir os parâmetros-chave do processo dentro desta fronteira de medição, isolando-se o chuveiro elétrico da instalação como um todo.

Conforme o PIMVP, alguns efeitos energéticos que afetam a AEE podem ocorrer fora da fronteira de medição. Estes são chamados *efeitos interativos*. De acordo com o Guia de M&V, é necessário defini-los, se existentes, e decidir se serão estimados ou ignorados. Neste contexto, considera-se que não há efeitos interativos, pois as perdas nos circuitos de alimentação da casa e do chuveiro podem ser consideradas desprezíveis, conforme o caso repassado às distribuidoras de energia elétrica de Plano de M&V para Aquecimento de Água em Baixa Renda (ANEEL, 2014 – c).

Outras definições importantes correspondem às variáveis independentes e aos fatores estáticos. As primeiras são as variáveis que, havendo correlação com o consumo de energia da instalação ou sistema desta, explicam a variação deste consumo, sendo utilizadas para ajustes necessários, através de análise de regressão linear. Já os fatores estáticos são aqueles que

definem o padrão de consumo de energia da instalação ou sistema desta, como tamanho da instalação e número de pessoas (EVO, 2012).

Também é necessário definir, conforme o PIMVP, os períodos de linha de base e de determinação da economia. O primeiro corresponde ao período de medição anterior à instalação dos equipamentos responsáveis pela AEE, e deve representar um ciclo de funcionamento completo dos componentes da fronteira de medição (por exemplo, se há sazonalidade ao longo do ano, o período deve ser de pelo menos um ano). O mesmo se aplica ao período de determinação da economia, porém, considerando-se este após a implantação da AEE (EVO, 2012). A definição destes dois períodos de medição corresponde ao procedimento “*Before-After*” apresentado no estudo pioneiro realizado por Christensen e Burch (1994) mencionado no Capítulo II.

De acordo com o Guia de M&V, durante o período de linha de base devem ser obtidos valores de parâmetros-chave e variáveis independentes, além de efeitos interativos e fatores estáticos, quando existentes (ANEEL, 2014 – a). Define-se como período de linha de base para PEE Residencial Orlando de Moraes 7 dias para cada residência em que houver medição. Conforme já mencionado anteriormente, a metodologia a ser utilizada para M&V da economia de energia e redução de demanda foi adaptada do PIMVP para a realidade dos PEE, em que medições de curto prazo são necessárias para a viabilidade econômica destes, pois, conforme o PIMVP, os custos de M&V não devem ultrapassar 10% das economias com a AEE.

Uma vez que os dados disponíveis referentes às medições anteriores à instalação dos sistemas de aquecimento solar no Residencial Real Conquista correspondem a 11 dias do mês de junho de 2010, este é o período considerado como linha de base. Também utilizando dados disponíveis de medições de 16 dias do mês de setembro de 2008, este é considerado o período de linha de base para o PEE Município de Itumbiara.

Quanto ao período de determinação de economia, como a AEE resultou na extinção do consumo por chuveiros elétricos, não são realizadas medições. Há que se destacar que os sistemas de aquecimento solar instalados nas residências destes PEE não possuem aquecimento complementar de água.

Os parâmetros-chave a serem medidos são: potência elétrica do chuveiro durante o uso; e tempo de banho. Com estes parâmetros, é possível se obter o consumo na fronteira de medição, para o cálculo da economia de energia e, considerando-se o horário de ponta definido pela CELG-D, para o cálculo da redução na demanda de ponta. Considera-se como “banho” todo intervalo com potência média maior que 0,1 kW, para evitar registros espúrios.

Considera-se como variável independente a temperatura ambiente, obtida a partir de medições da estação do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET - mais próxima, e fatores estáticos não são considerados, por serem de tamanho padrão as residências dos conjuntos habitacionais mencionados e por ser muito curto o período de medição.

A partir das definições acima, o PIMVP oferece quatro opções de determinação de economia de energia, conforme EVO (2012) e ANEEL (2014 – b):

- Opção A: M&V e estimativa de parâmetros-chave que definem o uso de energia pelos sistemas relacionados à AEE isoladamente, variando desde um período de curto prazo até contínua. Em relação às estimativas, devem ser apresentadas faixas de variação de valores, base para estimação e impacto na incerteza da eficiência energética obtida;
- Opção B: M&V de todos os parâmetros-chave que definem o uso de energia pelos sistemas relacionados à AEE isoladamente, variando desde um período de curto prazo até contínua. Pode ser usada, por exemplo, em projetos pilotos envolvendo nova tecnologia ou metodologia;
- Opção C: Avaliação do consumo de energia de toda a instalação, com M&V contínua no período de determinação da economia. É geralmente a opção de menor custo, porém, deve-se ter maior rigor em relação aos fatores estáticos, uma vez que a fronteira de medição é mais ampla;
- Opção D: Avaliação do consumo de energia de toda a instalação, utilizando-se simulação calibrada a partir de dados reais de faturas de energia de distribuidoras. Utilizada em novas instalações, onde o modelo simula os dados inexistentes de parâmetros do período de linha de base.

A Opção A – Medição Isolada dos Parâmetros-chave – é definida como a opção a ser utilizada para as avaliações de economia de energia elétrica e redução de demanda instantânea em PEE que contemplem aquecimento solar de água em habitações de baixa renda. Além de ser uma das opções específicas para fronteira de medição envolvendo um equipamento isolado da residência, a justificativa está no fato de esta opção ser indicada para períodos curtos de medição, essenciais para a viabilidade econômica dos PEE, além de envolver estimativas de um dos parâmetros-chave. De acordo com o Guia de M&V, uma vez escolhida a Opção A do PIMVP, devem ser apresentadas justificativas das estimativas, assim como

estabelecidas inspeções periódicas a fim de se verificar a continuidade da eficiência energética no longo prazo (ANEEL, 2014 – a).

Também é preciso planejar e realizar a verificação operacional dentro do PEE. De acordo com EVO (2012), esta envolve inspeção da instalação e teste de desempenho dos equipamentos responsáveis pela AEE, fornecendo o potencial de obtenção de economia. A verificação operacional é obrigatória em PEE cuja AEE é o aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda, conforme o Guia de M&V (ANEEL, 2014 – a). No caso destes PEE da CELG-D, a verificação operacional é realizada pelas empresas contratadas para implantação dos sistemas de aquecimento solar nas residências, e fiscalizadas pela CELG-D.

4.2.2 Definição do número de amostras inicial

A etapa da metodologia referente à definição de amostragem foi contemplada somente no estudo de caso que contempla o Residencial Orlando de Moraes, uma vez que neste houve definições anteriores às medições.

O número de residências contempladas com a substituição do chuveiro elétrico por sistema de aquecimento solar (SAS) de água para banho através do PEE Residencial Orlando de Moraes é de 544. Com base na equivalência dada pela NBR 5426 - Planos de Amostragem e Procedimentos na Inspeção por Atributos, a partir desta população, obteve-se o valor relacionado de 32 residências. O tamanho inicial da amostra corresponde ao produto do número de residências pelo número de dias do período de linha de base. Desta forma, obteve-se amostra inicial de 224 *residência.dia*, considerando-se 32 residências e 7 dias de medição. Já através das Expressões 3.1 e 3.2, obteve-se amostra inicial de 82 *residência.dia*, ou seja, considerando-se período de linha de base de 7 dias, isto equivale a medições em 12 residências, em número inteiro aproximado.

A partir destas duas estimativas, considerando-se as restrições referentes ao número de medidores disponíveis e o pouco tempo até a instalação do SAS nas últimas residências do Residencial Orlando de Moraes, a amostra inicial consistiu em 126 *residência.dia*, através de 18 residências com medições no período de linha de base. A Figura 13 mostra esta definição de amostragem.

	Residências	Dias	Residência.dia
NBR 5426	32	7	224
Expressões 3.1/3.2	12	7	82
Amostragem Inicial	18	7	126

Figura 13: Definição da amostragem inicial no PEE Residencial Orlando de Morais

4.2.3 Obtenção dos valores dos parâmetros-chave a partir de medição

Os parâmetros de processo potência elétrica e tempo de banho foram obtidos através de medição de energia consumida pelos chuveiros elétricos. Os medidores utilizados são da marca Itron, modelo C1BRL, e foram calibrados em 22/01/2013 no Setor de Laboratório e Medição da CELG-D, utilizando-se padrão de referência rastreado pela Rede Brasileira de Calibração. Tais medidores foram instalados diretamente entre o chuveiro elétrico e a instalação elétrica da residência, conforme ilustra a Figura 14. Já a Figura 15 ilustra o processo de extração dos dados de medição da memória de massa do medidor.

Uma vez que os medidores utilizados medem energia consumida pelo chuveiro ao longo do tempo, é possível transformar os valores obtidos em potência e tempo de banho, ou seja, nos parâmetros-chave definidos. Este procedimento é recomendado na metodologia utilizada para que o nível de precisão da amostragem seja obtido, uma vez que a variabilidade dos valores de potência é menor do que de energia consumida. Há que se destacar que sem esta transformação, o alcance do nível de precisão desejado leva ao aumento excessivo do número de amostras, o que pode tornar um PEE com estas características economicamente inviável.



Figura 14: Medidor de energia utilizado



Figura 15: Extração de dados de medição

Mesmo tendo sido desconsiderados os fatores estáticos por ser curto o período de determinação da economia, para se verificar os resultados em um período de maior duração o Plano de M&V define a necessidade de considerá-los. São exemplos de fatores estáticos o número de moradores e o número de cômodos. Neste sentido, para as residências selecionadas no PEE Residencial Orlando de Moraes, antes da instalação dos sistemas de aquecimento solar, aplicou-se o questionário disponibilizado no Anexo A. Neste, além do número de moradores e de cômodos, coletou-se a quantidade de eletrodomésticos, equipamentos eletrônicos e lâmpadas, a fim de se obter os componentes responsáveis pelo consumo de energia, além da informação da posição mais utilizada do chuveiro elétrico, importante para verificação de hábitos de banho. A aplicação dos questionários possibilitou contato direto com as famílias, obtendo-se relatos referentes às expectativas em relação à utilização do aquecimento solar de água para banho, principalmente quanto ao incremento no orçamento familiar a partir da economia financeira resultante.

4.2.4 Cálculos de economia de energia e redução na demanda de ponta

Como ferramentas para os cálculos que compõem a metodologia envolvida nos procedimentos adaptados do PIMVP, planilhas de cálculo foram disponibilizadas pela ANEEL para as distribuidoras de energia elétrica com o objetivo de facilitação dos cálculos e

padronização dos resultados de economia de energia e redução na demanda de ponta como consequência das AEE em diversos usos finais.

As planilhas específicas para PEE envolvendo aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda foram utilizadas para os cálculos do trabalho em questão, a partir dos três estudos de caso apresentados. A aplicação da metodologia através destas ferramentas possibilitou processo de aprendizado em relação à forma de alimentação dos dados, sequenciamento lógico dos cálculos e obtenção dos resultados conforme modelo padronizado. As dificuldades e dúvidas que estiveram presentes neste processo contribuíram para o melhor entendimento e facilitação para aplicação na avaliação de PEE das concessionárias de energia elétrica que estão por vir.

A primeira planilha utilizada, chamada aqui de “Planilha Auxiliar” tem como função organizar os dados de medição de potência e tempo de banho, além de realizar os primeiros cálculos que resultarão em dados de entrada para a segunda planilha utilizada, chamada neste trabalho de “Planilha Principal”.

O Anexo B apresenta parte da aba de alimentação da Planilha Auxiliar, com seus componentes de alimentação de dados e de cálculos automáticos.

Os componentes de alimentação de dados são:

- a) Número da amostra: representa um dia em uma residência;
- b) Número da residência: equivalente à unidade consumidora (UC);
- c) Número do dia de medição na residência;
- d) Multiplicação do número da amostra por 1.000, para efeito de utilização em cálculos envolvendo função de procura;
- e) Data, horário inicial, horário final e intervalo de registro de medição (em minutos);
- f) Valor acima do qual o registro de potência elétrica é considerado como medição, para que sejam evitados registros espúrios de utilização do chuveiro elétrico;
- g) Potência elétrica medida no intervalo de tempo: para os casos em que o instrumento realiza medição da potência elétrica, basta alimentar os dados. Já para os casos em que o instrumento realiza medição de energia elétrica consumida, é necessário convertê-la em potência elétrica. Para isto, basta multiplicar a potência elétrica por 12 (uma hora convertida em minutos dividida pelo intervalo de registro) e realizar ajustes de unidade;

- h) Temperatura ambiente no devido intervalo de medição, obtida a partir de dados de medição disponibilizados pelo INMET (a alimentação destes dados na Planilha Auxiliar é feita em aba de apoio, conforme Figura 16).

Os componentes de cálculos automáticos são:

- i) Contagem de tempo: contempla procedimento necessário para estimativa do tempo de banho no dia de medição e especificamente para o horário de ponta, uma vez que os registros ocorrem dentro de intervalos de 5 minutos. Neste campo é feita a contagem do número de banhos em três situações pré-definidas, sendo considerado “início” (1) do banho o intervalo em que não houve registro válido de potência elétrica consumida no intervalo anterior, “meio” o intervalo em que houve registro válido nos intervalos anterior e posterior, e “fim” o intervalo em que não houve registro válido no intervalo posterior;
- j) Energia elétrica consumida pelo chuveiro (kWh total): soma dos registros válidos de potência elétrica (em kW) multiplicado pelo intervalo de registro de medição (5 minutos convertidos em hora), considerando o dia de medição e especificamente o horário de ponta;
- k) Número de banhos no dia e no horário de ponta;
- l) Classificação do dia em útil ou não útil: caso seja dia não útil, não são considerados os registros para cálculo da redução na demanda de ponta. A classificação é feita a partir de calendário disponibilizado em aba de apoio, conforme Figura 16;
- m) kW máximo: máxima potência elétrica registrada no dia;
- n) Número total de minutos de banho estimado no dia: utilizando-se a contagem de tempo de banho, multiplica-se o número de minutos classificados como “meio” por cinco (considera-se que o banho se deu no intervalo todo), multiplica-se o número de minutos classificados como “início” e “fim” por 2,5 (estima-se que o banho se deu em metade do intervalo), e soma-se os resultados encontrados;
- o) Temperatura ambiente média no dia de medição;
- p) Minutos por banho: divisão do número total de minutos de banho estimado pelo número de banhos;
- q) Potência elétrica média (kW médio): energia elétrica diária consumida pelo chuveiro (em kWh) dividida pelo número total de minutos de banho estimado, convertidos para unidade de hora;

- r) Demanda no horário de ponta: média dos registros de potência elétrica no horário de ponta;
- s) Fator de carga na ponta (FCP): percentual da energia elétrica consumida pelo chuveiro no horário de ponta em relação ao dia de medição;
- t) Períodos na ponta: número de intervalos de registro de medição que se encontram no horário de ponta, através de contagem utilizando funções de procura e o horário de ponta alimentado em aba de apoio, conforme Figura 16.
- u) Registros no horário de ponta: considera o valor somente se pertencer ao horário de ponta em dia útil, mostrando a informação “FP” (fora da ponta) caso não esteja dentro destes critérios;
- v) Banhos: através de critérios condicionais, classifica o registro de banho em “início”, “meio” e “fim”, para utilização na contagem de tempo e cálculo do número total de minutos de banho estimado no dia.

Ponta: 18:00:00 a 21:00:00			
Estação INMET: GOIANIA - GO (OMM: 83423)			
Dia	Dia semana	Útil/Não útil	Temp
01/01/2010	8	Não útil	23,2
02/01/2010	6	Não útil	24,5
03/01/2010	7	Não útil	26,7
04/01/2010	1	Útil	28,0
05/01/2010	2	Útil	28,1
06/01/2010	3	Útil	25,3
07/01/2010	4	Útil	24,7
08/01/2010	5	Útil	23,6
09/01/2010	6	Não útil	26,5
10/01/2010	7	Não útil	25,7

Figura 16: Aba de apoio da Planilha Auxiliar

As informações contidas na Planilha Auxiliar, conforme alguns componentes da amostra apresentada através do Anexo B são organizadas em aba de apoio, através de funções de procura, constituindo os dados de entrada para a Planilha Principal. A Figura 17 mostra a alimentação dos dados de medição para a verificação da economia de energia e da redução na demanda de ponta.

O campo “°C Aquecim.” corresponde à temperatura de aquecimento da água, estimada através da subtração de 40°C pela temperatura ambiente do dia de medição. Com relação aos dados para verificação da redução na demanda, são considerados apenas os dias úteis, motivo

pelo qual alguns elementos da amostra não aparecem na Figura 17. Os elementos da amostra em que não houve registros de banho também não têm seus dados considerados, como ocorre com o elemento da amostra de número 11.

Economia de Energia				Redução na Demanda de Ponta			
Amostra	kW médio	Min/dia	°C Aquecim.	Amostra	kW médio	Min/dia	FCP
1	2,3	40,0	18,6	3	1,5	5,0	10%
2	3,5	25,0	18,2	4	4,1	7,5	68%
3	2,6	30,0	17,8	5	2,3	17,5	25%
4	3,6	12,5	16,3	6	0,0	17,5	0%
5	8,0	20,0	16,8	7	1,5	5,0	8%
6	1,6	20,0	15,1	10	1,5	17,5	49%
7	1,9	50,0	15,9	11			
8	2,5	32,5	17,5	14	2,4	12,5	62%
9	1,4	30,0	17,1	15	1,8	22,5	56%
10	2,0	27,5	17,7	16	1,5	17,5	48%

Figura 17: Alimentação dos dados na Planilha Principal

A Figura 18 mostra os campos em que são realizados os cálculos de média, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão e precisão de amostragem (que compõe a incerteza), a partir dos dados de medição para verificação da economia de energia elétrica. Estes campos são disponibilizados tanto para dados do período de linha de base como no período de determinação da economia, sendo que não houve medição no período de determinação da economia neste estudo. Os mesmos campos são utilizados para estes cálculos especificamente para o horário de ponta, os quais serão utilizados para verificação da redução na demanda de ponta.

A Figura 19 apresenta os campos em que são realizados os cálculos relativos à verificação de correlação entre o parâmetro-chave potência elétrica registrada com utilização do chuveiro e a temperatura de aquecimento da água estimada, que por utilização de cálculo simples já mencionado (temperatura ambiente subtraída de 40°C), pode representar a variável independente temperatura ambiente nesta verificação de correlação. Também é apresentado o campo onde é calculada a precisão que compõe a incerteza de modelagem, considerada em caso de correlação verificada.

A Figura 20 apresenta os resultados dos cálculos estatísticos apresentados acima, como dados de entrada para os cálculos finais que levarão aos resultados em termos de economia de energia elétrica e redução na demanda de ponta. Caso houvesse medição no período de determinação da economia, a Planilha Principal traz a possibilidade de correção dos valores

registrados de potência elétrica através de dados de radiação solar, o que não foi necessário no caso deste estudo.

ANEEL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA		DADOS DO PERÍODO DA LINHA DE BASE	
Responsável			
Sistema	Real Conquista		
Número de amostras	88		
Consumo	Real Conquista		
	Potência		Tempo de uso
Média	2,79 kW	33,21	min/dia
Desvio padrão	1,08 kW	19,60	min/dia
CV	39%	59%	
Erro padrão	0,11 kW	2,09	min/dia
Incerteza	0,23 kW	4,15	min/dia
	8%	13%	

Figura 18: Cálculos estatísticos dos dados de medição para verificação da economia de energia elétrica

Modelo	Real Conquista	
Coefficiente linear	1,76 kW	
Declividade	0,06 kW/oC	
R2	0,00	
Erro padrão	1,08 kW	
CV(EMQ)	38,7%	
Estatística t	0,52	
Incerteza	2,15 kW	
	77%	
Validar regressão?	Sugestão NÃO	Decisão NÃO

Figura 19: Cálculos relativos à verificação de correlação na Planilha Principal

Sistema	Real Conquista					
Unidades	base 478	determ. 478	Tempo operação (consumo)	Base 33,21	Determinação 0,0	min/dia
Potência linha de base	2,79	kW	Tempo operação (ponta)	19,82	0,0	min/dia
Potência determinação	0,000	kW	Modelo linha de base	Coef. linear 1,76	Declividade 0,06	Uso NÃO
Potência determinação corrigida radiação	0,000	kW		Coef. linear 0,0	Declividade 0,00	Uso NÃO
Potência ponta linha de base	2,46	kW	Modelo determinação			
Potência ponta determinação	0,0	kW	Temperatura média anual normalizada	25,0	°C	

Figura 20: Resultados estatísticos como dados de entrada para cálculos finais

Obtém-se o valor do consumo diário de energia elétrica pelo chuveiro multiplicando-se a potência média diária medida pelo tempo total de banho médio diário. Como a AEE elimina este consumo, já que não há aquecimento elétrico complementar de água junto ao SAS, a economia de energia corresponde ao consumo médio no período de linha de base. A partir do resultado obtido, é possível calcular a economia média mensal para uma unidade consumidora e, ao se aplicar este para a população de residências beneficiadas em um ano, obtém-se a economia de energia elétrica com a AEE do PEE.

Para a obtenção da potência elétrica média referente à utilização de chuveiros no horário de ponta – definido pela CELG-D como o período entre 18:00h e 21:00h – multiplica-se a potência média medida pelo tempo total de banho médio específicos deste intervalo, e divide-se este valor por três, dado que este é o número de horas do intervalo de ponta. Obtém-se então o valor médio retirado da ponta com a AEE em uma residência e, considerando-se a população de residências, calcula-se a redução na demanda de ponta obtida a partir do PEE.

A Figura 21 mostra os resultados finais dos cálculos de economia de energia elétrica e redução na demanda de ponta resultantes da substituição de chuveiros elétricos por sistemas de aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda, utilizando-se as planilhas disponibilizadas pela ANEEL às concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Com relação às planilhas utilizadas (Planilha Auxiliar e Planilha Principal), algumas considerações são destacadas. A automatização dos cálculos através das fórmulas e funções matemáticas fixadas nestas planilhas otimiza sua utilização, porém algumas destas necessitam de alteração, dependendo do número de elementos da amostra ou da unidade dos dados de

medição. Também alguns campos de alimentação de dados podem dificultar o entendimento e proporcionar erros por parte do usuário.

Energia linha de base normalizada	por residência	<input type="text" value="46,36"/>	kWh/mês	
	do projeto	<input type="text" value="265,92"/>	MWh/ano	
Energia determinação normalizada	por residência	<input type="text" value="0,00"/>	kWh/mês	Economia de energia elétrica
	do projeto	<input type="text" value="0,0"/>	MWh/ano	Energia - total <input type="text" value="265,92"/> MWh/ano
Demanda ponta linha de base	por residência	<input type="text" value="0,27"/>	kW	
	do projeto	<input type="text" value="129,29"/>	kW	
Demanda ponta determinação	por residência	<input type="text" value="0,00"/>	kW	Redução na demanda de ponta
	do projeto	<input type="text" value="0,0"/>	kW	RDP - Total <input type="text" value="129,29"/> kW

Figura 21: Resultados finais dos cálculos de economia de energia e redução na demanda de ponta

Observando-se o Anexo B, que apresenta a Planilha Auxiliar em sua aba de alimentação de dados e cálculos iniciais, o campo (a), por exemplo possui nome original na planilha como “Dia”, quando na verdade o campo representa o número da amostra, que corresponde ao produto do número do dia de medição com o número da residência, como anteriormente explicado, o que pode causar confusão ao usuário ainda não acostumado com sua utilização.

O campo (d) é utilizado como ponto de referência em funções de procura na planilha. Neste campo o número do elemento da amostra – campo (a) – é multiplicado por 100 originalmente. Porém, quando o número de amostras é maior que 100, a função de procura pode não retornar o valor correto, uma vez que o campo (a) da amostra de número 100 pode ser confundido com o resultado do campo (d) para a amostra de número 1. Para a utilização nos estudos de caso deste trabalho, este valor de multiplicação foi substituído por 1.000, o que atendeu estes casos específicos, porém acarretaria o mesmo problema em caso de números de amostras maiores que 1.000 *residência.dia*.

Outra alteração de fórmula pode ser necessária no campo (j). Pode-se observar que a unidade do campo (g) já disponibilizada na planilha é kW. Logo, caso os dados sejam disponibilizados no campo (g) em kW, é necessário retirar a divisão por 1.000 da expressão do campo (j). Para que esta alteração de fórmula não seja necessária, o usuário deve então disponibilizar os dados no campo (g) em W como unidade. O campo (m) encontra-se nesta mesma situação do campo (j), porém, sem utilidade aparente nos cálculos, sendo esta informação (potência máxima registrada na amostra) de caráter apenas informativo.

Na Planilha Principal também são destacados alguns pontos para possível melhoria. Na alimentação dos dados para os cálculos de economia de energia e redução na demanda de ponta, conforme Figura 17, o campo “Amostra” originalmente na planilha está denominado como “Dia” para dados de cálculo de economia de energia, e “Residência” para dados de cálculo de redução na demanda, quando se refere ao número da amostra, em *residência.dia*. Com relação aos dados para cálculo da redução da demanda, os valores de fator de carga na ponta (FCP) não possuem impacto nos cálculos para este fim, sendo aparentemente também de caráter informativo.

4.2.5 Apresentação dos resultados obtidos

Uma vez realizados os procedimentos de cálculos a partir da metodologia definida pelo PIMVP, utilizando-se os dados resultantes de medição conforme procedimentos adaptados deste Protocolo, a seguir são apresentados os resultados de cada etapa de cálculo que compõe a verificação da economia de energia elétrica e da redução na demanda de ponta nos três estudos de caso definidos.

4.2.5.1 Estudo de caso 1: PEE Residencial Orlando de Moraes

As medições foram realizadas entre os dias 13 e 19 de outubro de 2014 nas residências que compõem as amostras neste PEE. Verificou-se que os dados referentes a 7 medidores encontravam-se zerados a partir do terceiro ou quarto dia do período de medição. Constatou-se então que houve instalação de sistemas de aquecimento solar nestas residências durante este período. Desta forma, decidiu-se desconsiderar os dados dos medidores em questão, passando então a amostra real a ter o valor de 77 *residência.dia*, a qual é inferior às duas estimativas realizadas anteriormente.

O nível de precisão da amostragem obtido para os parâmetros-chave potência e tempo de banho foi de 18% e 27%, respectivamente, não atingindo assim a meta de 10%. Desta forma, haveria a necessidade de aumento do número de amostras, o que não foi possível devido à finalização da instalação dos sistemas de aquecimento solar nas residências remanescentes do conjunto habitacional. A continuação das etapas da metodologia mesmo não atingindo o nível de precisão desejado é justificada pelo caráter experimental do projeto.

Dentre os parâmetros-chave, definiu-se a potência elétrica como parâmetro com maior possibilidade de influência pela variável independente. Verificou-se, então, que não há correlação entre a potência elétrica de utilização do chuveiro e a temperatura ambiente no período de linha de base, uma vez que os critérios não foram atingidos, conforme resultados de cálculos a seguir:

- $R^2 = 0,2\% < 75,0\%$;
- $CV(EMQ) = 78,4\% > 5,0\%$;
- $Distribuição-t = 0,35 < 2,00$.

A economia de energia média diária por unidade habitacional do Residencial Orlando de Moraes foi calculada através da Expressão 3.9, desconsiderando-se os ajustes por não haver correlação entre parâmetros-chave e variável independente. Multiplicando-se a potência média diária medida – 1,56 kW – pelo tempo total de banho médio diário – 9,87 minutos convertidos para unidade de hora – obteve-se o valor de 256,38 Wh/dia. Como a AEE elimina o consumo de energia elétrica pelo chuveiro, a economia corresponde ao consumo médio no período de linha de base. A partir do resultado obtido, calculou-se a economia média mensal para uma unidade consumidora e, ao se aplicar este para a população do Residencial Orlando de Moraes em um ano, obteve-se a economia de energia elétrica com a AEE do PEE. A Tabela 1 apresenta estes resultados.

Tabela 1: Resultados dos cálculos de consumo de energia elétrica evitado com PEE Residencial Orlando de Moraes.

Resultados – Economia de energia elétrica	
Potência média do chuveiro (kW)	1,56
Tempo de uso médio do chuveiro (min/dia)	9,87
Consumo médio diário evitado para uma residência (Wh)	256,38
Consumo médio mensal evitado para uma residência (kWh)	7,69
Consumo médio anual evitado com o PEE (MWh)	50,21

Para a obtenção da potência elétrica média referente à utilização de chuveiros no horário de ponta multiplicou-se a potência média medida – 1,96 kW – pelo tempo total de banho médio – 7,96 minutos convertidos para unidade de hora – deste intervalo, e dividiu-se este valor por três, dado que este é o número de horas do intervalo de ponta. Obteve-se então

o valor médio retirado da ponta com a AEE em uma residência e, considerando-se a população do estudo, calculou-se a redução na demanda de ponta obtida a partir do PEE. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos cálculos de redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Moraes.

Resultados – Redução da demanda de ponta	
Potência média do chuveiro (kW)	1,96
Tempo de uso médio do chuveiro (min/dia)	7,96
Redução da demanda de ponta para uma residência (kW)	0,09
Redução da demanda de ponta com o PEE (kW)	47,28

Como mencionado anteriormente, é necessário que seja obtida a incerteza associada a cada parâmetro-chave relacionado ao cálculo do consumo de energia evitado e da demanda de ponta reduzida. A Tabela 3 mostra os resultados dos cálculos necessários para a obtenção da incerteza total relacionada à economia de energia média diária para uma residência com a AEE. A Tabela 4 mostra esta incerteza total obtida para os parâmetros-chave. Como foi verificado que não houve correlação entre consumo de energia e temperatura ambiente, não foram considerados os cálculos de erro padrão e precisão de modelagem.

Tabela 3: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção do consumo de energia evitado com PEE Residencial Orlando de Moraes.

Parâmetros-chave	Potência (kW)	Tempo de uso (min/dia)
Valor médio	1,56	9,87
Erro padrão de amostragem	0,14	1,35
Precisão absoluta de amostragem	0,28	2,68
Erro padrão de modelagem	-	-
Precisão absoluta de modelagem	-	-
Erro padrão de medição	0,02	-
Precisão absoluta de medição	0,01	-
Erro padrão combinado	0,14	1,35
Precisão absoluta combinada	0,28	2,68
Precisão relativa combinada	18%	27%

Tabela 4: Incerteza relativa relacionada ao consumo de energia evitado com PEE Residencial Orlando de Morais.

<i>Incerteza relativa dos parâmetros-chave</i>			
Potência (kW)	1,56	±	18%
Tempo de uso (min/dia)	9,87	±	27%

A Tabela 5 mostra os resultados dos cálculos necessários para a obtenção da incerteza total relacionada à redução na demanda de ponta média diária para uma residência com a AEE. Em seguida é apresentada a incerteza total relacionada à demanda do horário de ponta reduzida, através da Tabela 6.

Tabela 5: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção da redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Morais.

<i>Parâmetros-chave</i>	<i>Potência (kW)</i>	<i>Tempo de uso (min/dia)</i>
Valor médio	1,96	7,96
Erro padrão de amostragem	0,10	0,61
Precisão absoluta de amostragem	0,19	1,21
Erro padrão de medição	0,02	-
Precisão absoluta de medição	0,01	-
Erro padrão combinado	0,10	0,61
Precisão absoluta combinada	0,19	1,21
Precisão relativa combinada	10%	15%

Tabela 6: Incerteza relativa relacionada à redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Morais.

<i>Incerteza relativa dos parâmetros-chave</i>			
Potência (kW)	1,96	±	10%
Tempo de uso (min/dia)	7,96	±	15%

4.2.5.2 Estudo de caso 2: PEE Residencial Real Conquista

No estudo de caso em questão foram utilizados dados fornecidos pela CELG-D referentes a medições feitas entre os dias 19 e 29 de junho de 2010, antes da instalação dos sistemas de aquecimento solar, sendo este período definido como linha de base. Foram

utilizados também medidores da marca Itron, modelo C1BRL, em 8 residências do Residencial Real Conquista. Desta forma, a amostra real consistiu em 88 *residência.dia*.

Conforme já explicado anteriormente, com base na metodologia utilizada, a energia elétrica consumida por chuveiros obtida ao longo do tempo através das medições foi transformada em valores de potência e tempo de banho (parâmetros-chave). O nível de precisão da amostragem obtido para estes dois parâmetros foi de 8% e 13%, respectivamente. Desta forma, a meta de 10% de precisão foi alcançada para pelo menos um dos dois parâmetros, uma vez que o nível obtido para a potência elétrica foi menor do que 10%, conforme metodologia já explicada.

Dentre os parâmetros-chave, definiu-se a potência elétrica como parâmetro com maior possibilidade de influência pela variável independente. Também neste estudo de caso verificou-se que não há correlação entre a potência elétrica de utilização do chuveiro e a temperatura ambiente no período de linha de base. Os critérios pré-definidos não foram atingidos, conforme resultados de cálculos a seguir:

- $R^2 = 0,3\% < 75,0\%$;
- $CV(EMQ) = 38,7\% > 5,0\%$;
- $Distribuição-t = 0,52 < 2,00$.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos cálculos referentes à economia de energia elétrica com o PEE Residencial Real Conquista, a partir da metodologia já explicada e aplicada ao estudo de caso anterior. No mesmo sentido, a Tabela 8 apresenta os resultados obtidos referentes à redução na demanda de ponta.

Tabela 7: Resultados dos cálculos de consumo de energia elétrica evitado com PEE Residencial Real Conquista.

Resultados – Economia de energia elétrica	
Potência média do chuveiro (kW)	2,79
Tempo de uso médio do chuveiro (min/dia)	33,21
Consumo médio diário evitado para uma residência (Wh)	1.545,34
Consumo médio mensal evitado para uma residência (kWh)	46,36
Número de residências contempladas pela AEE	478
Consumo médio anual evitado com o PEE (MWh)	265,92

Tabela 8: Resultados dos cálculos de redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Morais.

<i>Resultados – Redução da demanda de ponta</i>	
Potência média do chuveiro (kW)	2,46
Tempo de uso médio do chuveiro (min/dia)	19,82
Redução da demanda de ponta para uma residência (kW)	0,27
Número de residências contempladas pela AEE	478
Redução da demanda de ponta com o PEE (kW)	129,29

A Tabela 9 mostra os resultados dos cálculos necessários para a obtenção da incerteza total relacionada à economia de energia média diária para uma residência com a AEE. A Tabela 10 mostra esta incerteza total obtida para os parâmetros-chave. Como foi verificado que não houve correlação entre consumo de energia e temperatura ambiente, não foram considerados os cálculos de erro padrão e precisão de modelagem.

Tabela 9: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção do consumo de energia evitado com PEE Residencial Real Conquista.

<i>Parâmetros-chave</i>	<i>Potência (kW)</i>	<i>Tempo de uso (min/dia)</i>
Valor médio	2,79	33,21
Erro padrão de amostragem	0,11	2,09
Precisão absoluta de amostragem	0,23	4,15
Erro padrão de modelagem	-	-
Precisão absoluta de modelagem	-	-
Erro padrão de medição	0,03	-
Precisão absoluta de medição	0,01	-
Erro padrão combinado	0,12	2,09
Precisão absoluta combinada	0,23	4,15
Precisão relativa combinada	8%	13%

Tabela 10: Incerteza relativa relacionada ao consumo de energia evitado com PEE Residencial Real Conquista.

<i>Incerteza relativa dos parâmetros-chave</i>			
Potência (kW)	2,79	±	8%
Tempo de uso (min/dia)	33,21	±	13%

A Tabela 11 mostra os resultados dos cálculos necessários para a obtenção da incerteza total relacionada à redução na demanda de ponta média diária para uma residência com a AEE. Em seguida é apresentada a incerteza total relacionada à demanda do horário de ponta reduzida, através da Tabela 12.

Tabela 11: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção da redução na demanda de ponta com PEE Residencial Real Conquista.

<i>Parâmetros-chave</i>	<i>Potência (kW)</i>	<i>Tempo de uso (min/dia)</i>
Valor médio	2,46	19,82
Erro padrão de amostragem	0,09	1,20
Precisão absoluta de amostragem	0,18	2,38
Erro padrão de medição	0,03	-
Precisão absoluta de medição	0,01	-
Erro padrão combinado	0,10	0,61
Precisão absoluta combinada	0,20	1,21
Precisão relativa combinada	8%	12%

Tabela 12: Incerteza relativa relacionada à redução na demanda de ponta com PEE Residencial Orlando de Morais.

<i>Incerteza relativa dos parâmetros-chave</i>			
Potência (kW)	2,46	±	8%
Tempo de uso (min/dia)	19,82	±	12%

4.2.5.3 Estudo de caso 3: PEE Município de Itumbiara

Assim como nas análises e cálculos para a obtenção dos resultados referentes ao PEE Residencial Real Conquista, no estudo de caso envolvendo o PEE Município de Itumbiara

foram utilizados dados fornecidos pela CELG-D referentes a medições feitas no passado, antes da instalação dos sistemas de aquecimento solar. Para o caso em questão as medições foram realizadas entre os dias 10 e 25 de setembro de 2008, sendo este período definido como linha de base. A medição ocorreu em 4 residências contempladas pelo PEE Município de Itumbiara, sendo então a amostra real constituída de 64 *residência.dia*. Os medidores de energia utilizados foram os mesmos descritos nos demais estudos de caso.

O nível de precisão da amostragem obtido para os parâmetros-chave potência e tempo de banho foi de 12% e 17%, respectivamente. Desta forma, a meta de 10% de precisão não foi alcançada para pelo menos um dos dois parâmetros, o que resultaria em aumento do número de amostras, caso fosse possível. Como os dados são de medições realizadas no passado, em conjunto habitacional em que a instalação dos SAS foi finalizada, a amostra real foi mantida.

Também neste estudo de caso verificou-se que não há correlação entre a potência elétrica de utilização do chuveiro e a temperatura ambiente no período de linha de base. Os critérios pré-definidos não foram atingidos, conforme resultados de cálculos a seguir:

- $R^2 = 0,0\% < 75,0\%$;
- $CV(EMQ) = 47,0\% > 5,0\%$;
- $Distribuição-t = 0,07 < 2,00$.

A Tabela 13 e a Tabela 14 apresentam os resultados dos cálculos referentes à economia de energia elétrica e à redução na demanda de ponta com o PEE Município de Itumbiara, respectivamente.

Tabela 13: Resultados dos cálculos de consumo de energia elétrica evitado com PEE Município de Itumbiara.

<i>Resultados – Economia de energia elétrica</i>	
Potência média do chuveiro (kW)	2,79
Tempo de uso médio do chuveiro (min/dia)	34,57
Consumo médio diário evitado para uma residência (Wh)	1.606,01
Consumo médio mensal evitado para uma residência (kWh)	48,18
Número de residências contempladas pela AEE	1.080
Consumo médio anual evitado com o PEE (MWh)	624,42

Tabela 14: Resultados dos cálculos de redução na demanda de ponta com PEE Município de Itumbiara.

<i>Resultados – Redução da demanda de ponta</i>	
Potência média do chuveiro (kW)	3,08
Tempo de uso médio do chuveiro (min/dia)	19,09
Redução da demanda de ponta para uma residência (kW)	0,33
Número de residências contempladas pela AEE	1.080
Redução da demanda de ponta com o PEE (kW)	352,92

A Tabela 15 mostra os resultados dos cálculos necessários para a obtenção da incerteza total relacionada à economia de energia média diária para uma residência com a AEE. A Tabela 16 mostra esta incerteza total obtida para os parâmetros-chave. Assim como nos demais estudos de caso, uma vez verificado que não houve correlação entre consumo de energia e temperatura ambiente, não foram considerados os cálculos de erro padrão e precisão de modelagem.

Tabela 15: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção do consumo de energia evitado com PEE Município de Itumbiara.

<i>Parâmetros-chave</i>	<i>Potência (kW)</i>	<i>Tempo de uso (min/dia)</i>
Valor médio	2,79	34,57
Erro padrão de amostragem	0,16	2,88
Precisão absoluta de amostragem	0,32	5,75
Erro padrão de modelagem	-	-
Precisão absoluta de modelagem	-	-
Erro padrão de medição	0,03	-
Precisão absoluta de medição	0,01	-
Erro padrão combinado	0,16	2,88
Precisão absoluta combinada	0,33	5,75
Precisão relativa combinada	12%	17%

Tabela 16: Incerteza relativa relacionada ao consumo de energia evitado com PEE Município de Itumbiara.

<i>Incerteza relativa dos parâmetros-chave</i>			
Potência (kW)	2,79	±	12%
Tempo de uso (min/dia)	34,57	±	17%

A Tabela 17 mostra os resultados dos cálculos necessários para a obtenção da incerteza total relacionada à redução na demanda de ponta média diária para uma residência com a AEE. Em seguida é apresentada a incerteza total relacionada à demanda do horário de ponta reduzida, através da Tabela 18.

Tabela 17: Resultados dos cálculos de erro padrão e precisão relacionados à obtenção da redução na demanda de ponta com PEE Município de Itumbiara.

<i>Parâmetros-chave</i>	<i>Potência (kW)</i>	<i>Tempo de uso (min/dia)</i>
Valor médio	3,08	19,09
Erro padrão de amostragem	0,12	1,08
Precisão absoluta de amostragem	0,24	2,17
Erro padrão de medição	0,03	-
Precisão absoluta de medição	0,01	-
Erro padrão combinado	0,12	1,08
Precisão absoluta combinada	0,24	2,17
Precisão relativa combinada	8%	11%

Tabela 18: Incerteza relativa relacionada à redução na demanda de ponta com PEE Município de Itumbiara.

<i>Incerteza relativa dos parâmetros-chave</i>			
Potência (kW)	3,08	±	8%
Tempo de uso (min/dia)	19,09	±	11%

4.2.6 Considerações sobre os resultados

A partir dos dados de medição dos estudos de caso, é possível obter o perfil de utilização de chuveiros elétricos ao longo das vinte e quatro horas de um dia. Este foi obtido,

para cada caso, ao distribuir-se percentualmente entre os intervalos de medição o consumo somado de todas as residências. A Figura 22, a Figura 23 e a Figura 24 apresentam o perfil de banho para cada PEE, a partir dos dados de medição.

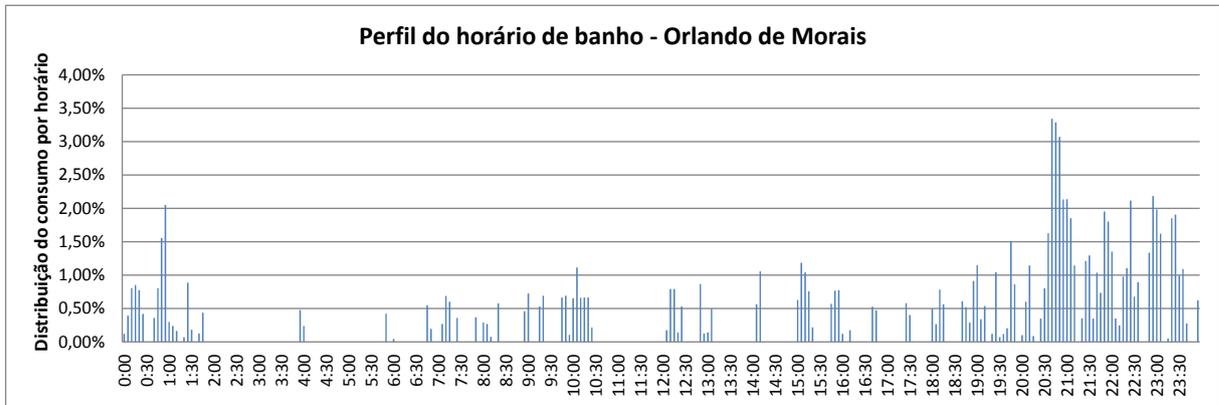


Figura 22: Perfil de utilização do chuveiro ao longo do dia - PEE Orlando de Moraes

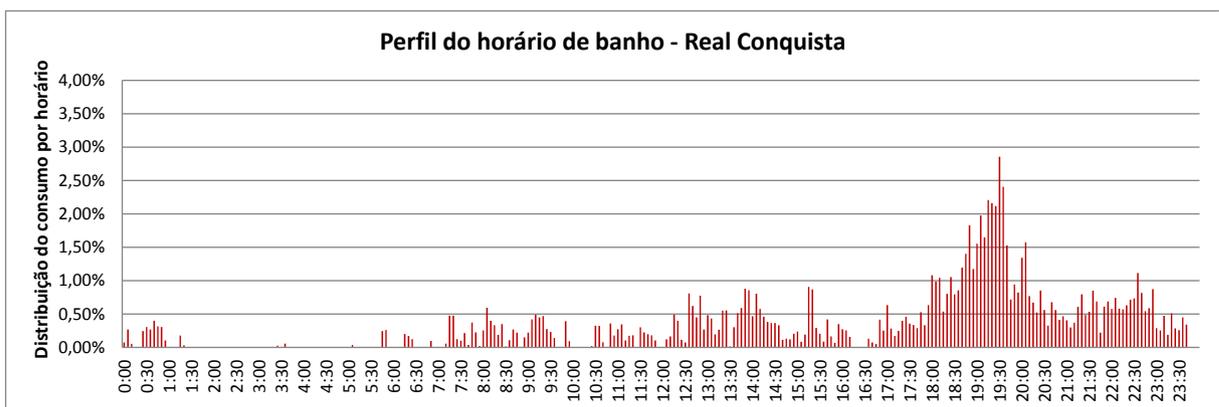


Figura 23: Perfil de utilização do chuveiro ao longo do dia - PEE Real Conquista

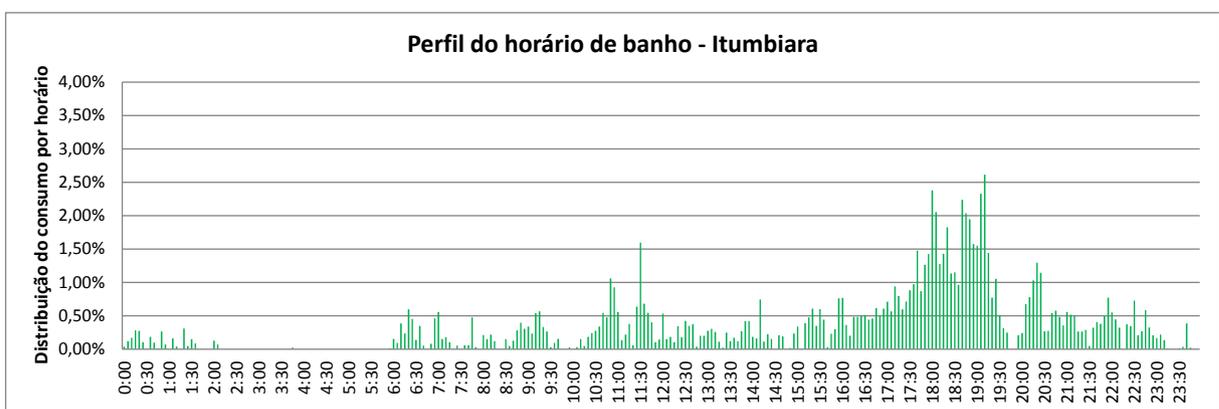


Figura 24: Perfil de utilização do chuveiro ao longo do dia - PEE Município de Itumbiara

É possível observar através dos perfis de banho que há maior utilização dos chuveiros elétricos no período noturno, como já esperado, uma vez que, em geral, este é o período em que as pessoas retornam de suas atividades diárias para suas residências. Apesar de se notar diferenças nos picos de utilização – entre 18:00h e 19:30h em Itumbiara, entre 19:00h e 19:30h no Residencial Real Conquista e entre 20:30h e 21:00h no Residencial Orlando de Moraes, nota-se o impacto da utilização do chuveiro elétrico para o sistema elétrico, no sentido de fornecer energia necessária no horário de ponta.

A Tabela 19 mostra os resultados da obtenção do nível de precisão da amostragem nos três estudos de caso. Para que uma amostragem seja estatisticamente válida, o nível de precisão deve ser menor ou igual a 10% para pelo menos um dos parâmetros-chave, sendo tais parâmetros considerados medição. O parâmetro-chave tempo de banho é considerado como estimativa (e não medição), uma vez que o nível de precisão desejado não é obtido, além do fato de que o medidor utilizado não realiza medição contínua do tempo de banho, sendo necessário estimá-lo a partir dos registros de energia consumida pelo chuveiro durante os intervalos de 5 minutos.

Tabela 19: Comparação de dados e resultados de economia de energia dos PEE

Número de amostras	Orlando de Moraes	Real Conquista	Itumbiara
Número de residências com M&V	11	8	16
Número de dias de medição	7	11	4
Número de amostras (residência.dia)	77	88	64
Nível de precisão do parâmetro-chave: potência elétrica	18%	8%	12%
Nível de precisão do parâmetro-chave: tempo de banho	27%	13%	17%

O nível de precisão obtido para o parâmetro-chave potência elétrica somente é válido para o Residencial Real Conquista. Nos demais estudos de caso, haveria a necessidade de aumento no número de amostras, o que não foi possível devido às questões já mencionadas. A continuação das etapas da metodologia mesmo não atingindo o nível de precisão é justificada pelo caráter experimental do projeto.

A Tabela 20 apresenta o comparativo dos resultados obtidos relacionados à economia de energia elétrica a partir dos três estudos de caso. É possível observar que o consumo médio diário de energia evitado por residência é significativamente maior com os PEE Residencial Real Conquista e Itumbiara, sendo tais valores de ambos cerca de seis vezes a economia obtida com o PEE Residencial Orlando de Moraes. Tanto a potência elétrica média como o tempo de banho médio diário são menores neste último.

Tabela 20: Comparação de dados e resultados de economia de energia dos PEE

<i>Dados e Resultados</i>	<i>Orlando de Moraes</i>	<i>Real Conquista</i>	<i>Itumbiara</i>
Número de residências contempladas com a AEE	544	478	1.080
Potência média diária por residência (kW)	1,56	2,79	2,79
Tempo de banho médio diário total por residência (minutos)	9,87	33,21	34,57
Consumo de energia evitado médio diário por residência (Wh)	256,38	1.545,34	1.606,01
Consumo de energia evitado médio mensal por residência (kWh)	7,69	46,36	48,18
Consumo anual de energia evitado com o PEE (MWh)	50,21	265,92	624,42

O tempo de banho diário pode ser consequência da quantidade de banhos nas residências do conjunto habitacional, assim como da rotina local em relação ao tempo de banho. Para se verificar estas duas influências, seria necessário considerar os dados relacionados aos fatores estáticos e hábitos dos moradores das residências contempladas nas amostras, o que não foi possível em relação aos PEE Real Conquista e Município de Itumbiara. Assim, mostra-se a importância do levantamento de informações comportamentais a respeito da rotina das famílias e das residências da amostra de um PEE, assim como armazenamento destas informações, para que seja possível realizar comparações entre resultados, levando-se em consideração as condições e realidades da população de cada localização avaliada.

Exemplos de informações importantes para subsidiar análises em relação ao tempo de banho médio foram obtidos no Residencial Orlando de Moraes, em entrevista junto às famílias antes das medições no período de linha de base. A média de número de moradores das residências que serviram como amostra é de 2,2 pessoas, a qual pode ser considerada um valor baixo para um conjunto habitacional habitado por famílias de baixa renda, mesmo sendo as residências de pequeno porte. Há também relatos que podem ser considerados, como a preferência por um dos banhos diários ocorrer no local de trabalho da pessoa, devido ao afastamento do residencial em relação às regiões centrais do município.

A diferença entre a potência elétrica média diária obtida no PEE Residencial Orlando de Moraes e as obtidas nos demais estudos de caso pode ser explicada pela posição da chave seletora de aquecimento de água do chuveiro elétrico nas residências durante o período de medição. Ao se verificar a temperatura ambiente média dos dias de medição de cada PEE, verifica-se grande diferença entre o Residencial Orlando de Moraes e os demais. Neste, a temperatura média foi de 30,5 °C, enquanto que nos dias de medição nos PEE Residencial Real Conquista e Itumbiara esta foi de 22,9 °C e 24,0 °C, respectivamente, o que pode ter influenciado a posição associada a uma maior potência utilizada no chuveiro elétrico, e consequentemente a potência elétrica média diária maior obtida nestes dois PEE.

Também contribui para valores médios menores de potência elétrica e tempo de banho referentes ao PEE Orlando de Moraes o fato de tais valores médios serem obtidos considerando-se inclusive amostras em que os valores diários destes parâmetros-chave correspondem a zero, ou seja, em que não houve registro de consumo de energia elétrica pelo chuveiro no dia de medição na residência. Isto ocorreu em 19 das 77 amostras deste estudo de caso, ou porque não houve banho no dia na residência, ou mais provavelmente porque, devido à alta temperatura, o banho foi tomado com água não aquecida, não havendo assim consumo registrado.

Tais amostras com valores de parâmetros-chave zerados reduzem os valores médios obtidos, mas ao desconsiderá-las pode-se superestimar a economia de energia obtida com o PEE. Quando desconsideradas, a potência média no PEE Orlando de Moraes passa a ser 2,04 kW, o que fica mais próxima da potência de um chuveiro comum em posição “verão”, e o tempo de banho médio passa a ser 12,46 minutos. Ou seja, quando analisados os valores médios dos parâmetros-chave, estes podem parecer baixos, mas garante-se assim que a economia de energia e a redução na demanda de ponta não sejam superestimados, respeitando-se desta forma um dos princípios do PIMVP.

Com o consumo médio mensal de energia evitado por residência obtido em cada estudo de caso, é possível estimar a representação desta economia sobre o consumo das residências contempladas pela AEE. Conforme informação repassada pela CELG-D, o consumo médio mensal de energia elétrica considerando residências de baixa renda no estado de Goiás é de 77,17 kWh. Verificou-se, então, que a economia de energia elétrica com a AEE representa aproximadamente 10%, 60% e 62% do consumo médio mensal de residências de baixa renda em Goiás, nos PEE Residencial Orlando de Moraes, Residencial Real Conquista e Itumbiara, respectivamente. Estes resultados são expressivos quanto se trata de economia financeira para famílias de baixa renda, o que contribui para melhoria na qualidade de vida destas.

A Tabela 21 apresenta o comparativo dos resultados obtidos relacionados à redução na demanda de ponta a partir dos três estudos de caso. Assim como a economia de energia média diária, a redução média na demanda de ponta por residência é significativamente maior com os PEE Residencial Real Conquista e Itumbiara. As possíveis causas desta diferença são as mesmas já mencionadas no comparativo entre resultados relacionados à economia de energia (temperatura ambiente e potência selecionada para operação do chuveiro), já que tanto a potência elétrica média como o tempo de banho médio no horário de ponta são menores no PEE Residencial Orlando de Moraes.

Tabela 21: Resultados de redução na demanda de ponta com os PEE

<i>Dados e Resultados</i>	<i>Orlando de Moraes</i>	<i>Real Conquista</i>	<i>Itumbiara</i>
Número de residências contempladas com a AEE	544	478	1.080
Potência média diária por residência (kW)	1,96	2,46	3,08
Tempo de banho médio diário na ponta por residência (minutos)	7,96	19,82	19,09
Redução média na demanda de ponta por residência (kW)	0,09	0,27	0,33
Redução na demanda de ponta com o PEE (kW)	47,28	129,29	352,92

A redução na demanda de ponta com um PEE pode ser comparada com valores reais de demanda no horário de ponta para se verificar o impacto obtido. Para esta comparação, foi utilizado o valor de demanda máxima no horário de ponta no estado de Goiás em 2014: 2.381 MW – dado repassado pela CELG-D. Verificou-se, então, que as reduções obtidas com os PEE Residencial Orlando de Moraes, Residencial Real Conquista e Itumbiara, em relação à demanda de ponta mencionada, representam 0,002%, 0,005% e 0,015%, respectivamente. Considerando-se a soma da redução obtida pelos três casos, esta representa 0,022% da demanda de ponta utilizada como base. Para se obter uma estimativa do impacto a partir de diversos PEE que contemplem aquecimento solar de água em residências de baixa renda no estado de Goiás, considerou-se a média da redução obtida nos três estudos de caso multiplicada pelo número de residências contempladas com esta AEE a partir de PEE cadastrados na ANEEL pela CELG-D: 5.632 residências. Obteve-se assim o valor de 1,28 MW de redução na demanda de ponta, o que representa 0,054% da demanda máxima no horário de ponta no estado de Goiás em 2014.

Para se ter uma melhor ideia sobre o benefício da redução de 1,28 MW na demanda de ponta do estado de Goiás, buscou-se comparar o custo desta redução com o custo de geração elétrica em dois cenários. Para o cálculo do custo da redução da demanda de ponta, utilizou-se a Expressão 4.1.

$$Custo_{RDP} = \left(\frac{Investimento_{RDP}}{RD_{883}} \right) \cdot \left(\frac{RD_{883} \cdot CED}{RD_{883} \cdot CED + EE_{883} \cdot CEE} \right) \quad (4.1)$$

onde,

- $Custo_{RDP}$ representa o custo da redução na demanda de ponta com PEE;
- $Investimento_{RDP}$ corresponde ao investimento em PEE, calculado através do número de chuveiros do PEE nº 883 cadastrado na ANEEL e preço unitário, ambos repassados pela CELG-D;
- RD_{883} é a redução na demanda de ponta com PEE nº 883 cadastrado na ANEEL;
- CED corresponde ao custo unitário de redução na demanda de ponta, repassado pela CELG-D;
- EE_{883} representa a economia de energia elétrica com PEE, calculado através da multiplicação da economia de energia média anual por residência (média dos três estudos de caso) com o número de chuveiros do PEE nº 883 cadastrado na ANEEL;
- CEE é o custo unitário de economia de energia, repassado pela CELG-D.

A Tabela 22 apresenta os componentes do cálculo do custo da redução de 1,28 MW na demanda de ponta do estado de Goiás.

Tabela 22: Cálculo do custo da redução na demanda de ponta com PEE nº 883/ANEEL

$Investimento_{RDP}$ (R\$)	9.122.319,36
RD_{883} (kW)	1.284,40
CED (R\$/kW.ano)	466,96
EE_{883} (MWh/ano)	2.303,08
CEE (R\$/MWh)	332,71
$Custo_{RDP}$ (R\$/kW)	3.118,35

Através da planilha informativa mensal contendo a consolidação dos resultados de leilões de energia elétrica publicada no mês de agosto de 2015, disponibilizada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, entidade regulada pela ANEEL que tem por finalidade viabilizar a comercialização de energia elétrica no país, é possível calcular dois cenários de custo de geração de energia elétrica, a partir da divisão do somatório dos investimentos pelo somatório da garantia física dos empreendimentos considerando: energia comercializada proveniente de leilões de energia nova; e somente energia comercializada proveniente de fontes térmicas. A Tabela 23 apresenta os custos de geração elétrica calculados.

Tabela 23: Custo de geração elétrica obtido de dados de leilões de energia

	Energia Nova	Fonte Térmica
\sum Investimento (R\$)	59.757.054.906,00	14.679.178.880,00
\sum Garantia Física (kW)	17.239.820,00	3.815.700,00
Custo de Geração (R\$/kW)	3.466,22	3.847,05

Comparando-se os resultados da Tabela 22 e da Tabela 23, verifica-se que o custo da redução de 1,28 MW na demanda de ponta é menor que o custo de geração elétrica em ambos os cenários. Logo, a substituição de chuveiros elétricos por sistemas que aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda como AEE pode proporcionar postergação de investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para o sistema elétrico.

Há que se destacar que o custo de geração elétrica utilizado para esta comparação corresponde ao custo de capital das usinas responsáveis por tal geração, ou seja, quando considerado, o custo operacional destas usinas ao longo do tempo intensificaria a vantagem de se promover a AEE para redução da demanda por energia elétrica no horário de ponta.

A Tabela 24 mostra o comparativo da incerteza calculada para os parâmetros-chave utilizados para obtenção do consumo de energia elétrica evitado, em cada estudo de caso. A diferença observada reflete a dispersão dos valores de medição que impactam na incerteza de amostragem, principalmente em relação ao PEE Orlando de Moraes, uma vez que a incerteza de modelagem não foi considerada e a incerteza de medição é a mesma em todos os casos. O comparativo da incerteza calculada para os parâmetros-chave utilizados para verificação da redução na demanda de ponta nos três estudos de caso é apresentado na Tabela 25.

Tabela 24: Comparativo da incerteza calculada para economia de energia nos estudos de caso

Incerteza relativa dos parâmetros-chave				
Orlando de Moraes	Potência (kW)	1,56	±	18%
	Tempo de uso (min/dia)	9,87	±	27%
Real Conquista	Potência (kW)	2,79	±	8%
	Tempo de uso (min/dia)	33,21	±	13%
Itumbiara	Potência (kW)	2,79	±	12%
	Tempo de uso (min/dia)	34,57	±	17%

Tabela 25: Comparativo da incerteza calculada para redução na demanda de ponta nos estudos de caso

Incerteza relativa dos parâmetros-chave				
Orlando de Moraes	Potência (kW)	1,96	±	10%
	Tempo de uso (min/dia)	7,96	±	15%
Real Conquista	Potência (kW)	2,46	±	8%
	Tempo de uso (min/dia)	19,82	±	12%
Itumbiara	Potência (kW)	3,08	±	8%
	Tempo de uso (min/dia)	19,09	±	11%

4.3 PROJEÇÃO DE CENÁRIOS DE ECONOMIA DE ENERGIA RESULTANTE DE PEE

4.3.1 Definições para a simulação das séries temporais

Primeiramente, para a implementação da simulação, são necessárias algumas definições. À economia de energia elétrica no ano inicial (valor de partida) é atribuído o valor referente ao consumo anual de energia evitado pelo PEE Residencial Real Conquista (economia de energia no instante $t = 1$), por ser o valor intermediário entre os resultados obtidos para consumo anual de energia elétrica evitado pelos três PEE.

A volatilidade (σ) do passeio aleatório é definida como o desvio padrão estimado da economia de energia anual, obtido a partir da multiplicação do coeficiente de variação calculado com os valores medidos de potência elétrica no PEE Residencial Real Conquista (0,39) pela economia de energia elétrica no ano inicial (média). Já à velocidade de reversão para a média (η) é atribuído o valor de 0,50. Tanto esta como a volatilidade do passeio aleatório deveriam ter valores atribuídos com base em dados históricos. Porém, pela ausência destes dados, visto o caráter pioneiro deste estudo, não foi possível realizar a análise estatística adequada para a obtenção dos valores, sendo feita as atribuições mencionadas.

A Tabela 26 apresenta os dados de entrada para a simulação, incluindo o horizonte de análise, o intervalo entre períodos de simulação, o número de cenários gerados por período, além de valores atribuídos conforme informações já mencionadas.

Tabela 26: Dados de entrada para simulação

Valor de partida (MWh)	265,92
Volatilidade do passeio aleatório (MWh)	103,71
Velocidade de reversão para a média	0,50
Horizonte de simulação (anos)	10
Intervalo entre períodos de simulação (anos)	1
Número de cenários	2.000

4.3.2 Análise dos resultados da simulação das séries temporais

A Figura 25 apresenta o passeio aleatório da variável economia anual de energia elétrica em um único cenário, ou seja, um possível comportamento desta variável aleatória ao longo

do horizonte. Já a Figura 26 apresenta os resultados da simulação das 2.000 séries temporais, o que fornece uma previsão de valores de economia anual de energia obtidos a partir de leis probabilísticas, considerando-se o processo estocástico Movimento Geométrico Browniano (MGB) com reversão para a média.

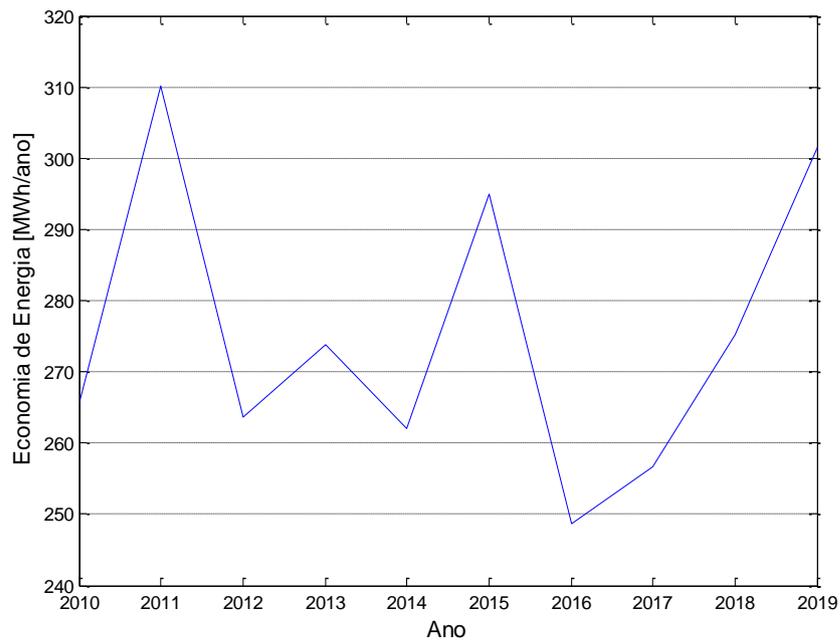


Figura 25: Comportamento da variável aleatória ao longo do passeio aleatório

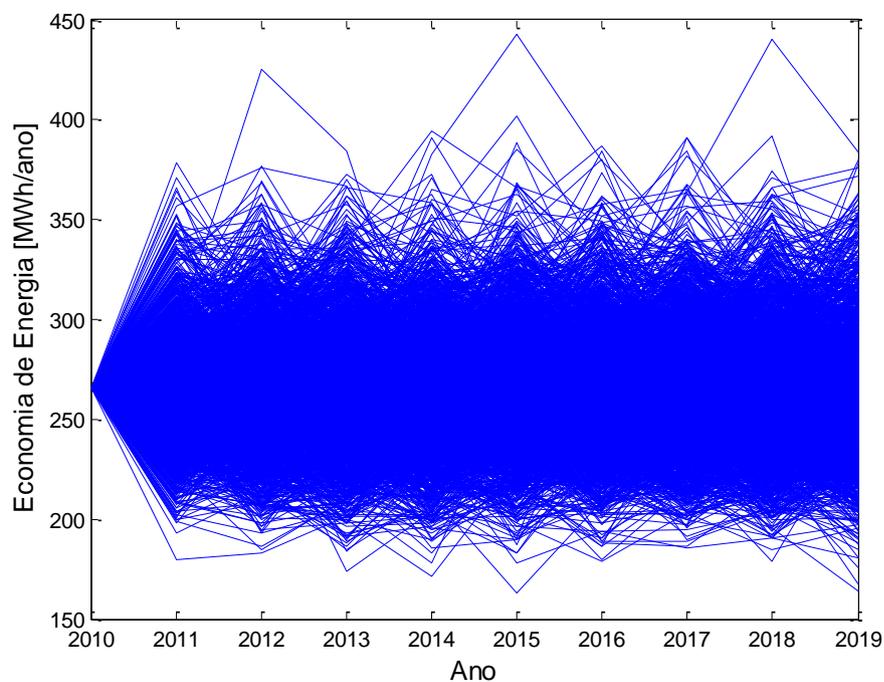


Figura 26: Séries temporais da economia anual de energia para 2.000 cenários

A Figura 27 apresenta a função densidade de probabilidade (FDP) para cada ano do horizonte do estudo, também como forma de representação dos cenários futuros para a economia anual de energia elétrica obtida com o PEE Residencial Real Conquista resultantes da simulação a partir do processo estocástico MGB com reversão para a média. A linha indicada nesta figura representa a média dos valores obtidos nas séries temporais, em cada ano, a qual permanece em torno de 265 MWh.

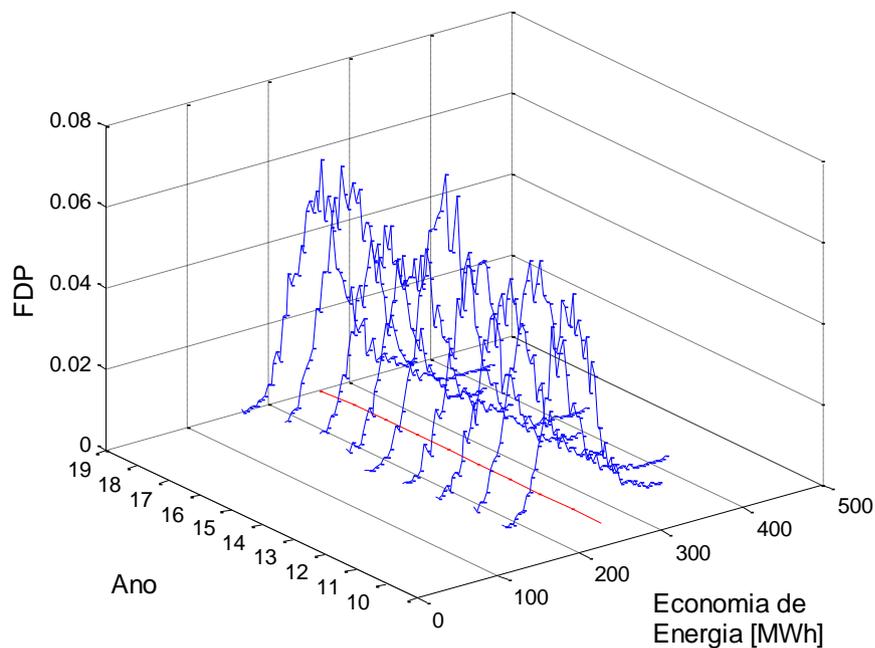


Figura 27: FDP dos valores de economia anual de energia no tempo

4.3.3 Análise de sensibilidade de valores atribuídos

Uma vez que os valores da velocidade de reversão para a média (η) e da volatilidade (σ) do passeio aleatório foram atribuídos, sem a possibilidade de obtê-los através de dados históricos, as séries temporais resultantes podem não representar de fato a projeção de cenários futuros para a economia de energia elétrica a partir de um PEE. Logo, a análise de sensibilidade dos valores atribuídos a estas constantes em um determinado ano do horizonte de simulação é realizada, a fim de se obter projeção dos cenários futuros com maior abrangência de situações. As definições feitas para esta simulação são as mesmas já apresentadas, com as seguintes mudanças:

- faixa de volatilidade (σ) do passeio aleatório¹ entre 0 e 265,92 MWh, com variação de 13,3 MWh;
- velocidade de reversão para a média (η)²: 0,1 a 10, com variação de 0,1;
- ano 3 do horizonte inicial de simulação.

A Figura 28 apresenta o comportamento da simulação das 2000 séries – a partir de seus valores máximos e mínimos – para o ano 3 do horizonte, variando-se a volatilidade do passeio aleatório e a velocidade de reversão para a média. Como esperado, a amplitude aumenta tanto com o aumento do desvio padrão como da velocidade de reversão à média.

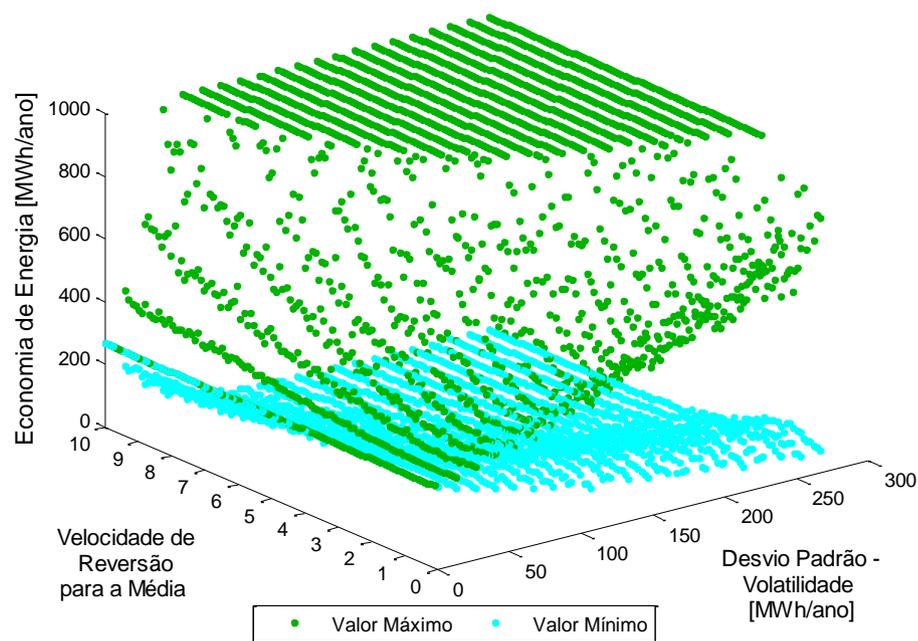


Figura 28: Amplitude dos valores de economia de energia variando-se σ e η

Em complemento, a Figura 29 mostra a média e o desvio padrão dos valores de economia de energia para as 2.000 séries no ano 3, em cada conjunto de valores do desvio padrão (volatilidade) e da velocidade de reversão para a média.

Como a variação dos parâmetros mencionados nesta análise de sensibilidade resultou em alguns valores de economia anual de energia elétrica extremamente elevados, a Figura 28 e a Figura 29 tiveram o eixo z limitado graficamente a 1.000 MWh/ano, a fim de se destacar o comportamento ao longo das variações. Verifica-se, através destas figuras, que o aumento do

¹ Equivalente à variação do coeficiente de variação de 0 a 1, com incremento de 0,05.

² Uma vez que a obtenção da velocidade de reversão para a média através de dados históricos ocorre através de regressão linear, conforme [4] ou seja, corresponde à inclinação da reta (componente “a” da equação da reta de tendência “ $y=a.x+b$ ”), esta faixa possui grande abrangência de valores possíveis.

desvio padrão leva à maior dispersão dos resultados, porém, é com o aumento da velocidade de reversão para a média que se verifica o aumento mais brusco na média e no desvio padrão das 2.000 séries.

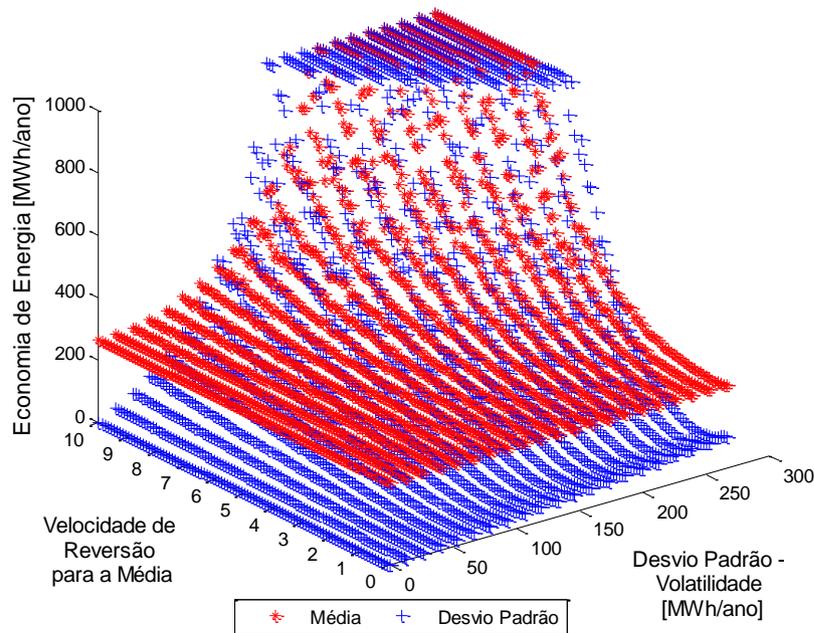


Figura 29: Média e desvio padrão dos valores de economia de energia variando-se σ e η

Tais comportamentos são também visualizados através da Figura 30 e da Figura 31. Na primeira, manteve-se a velocidade de reversão para a média constante em 0,5 e variou-se o desvio padrão que representa a volatilidade. Na Figura 31 manteve-se o desvio padrão (volatilidade) fixo em 103,71 MWh e variou-se a velocidade de reversão para a média. Também é possível verificar nesta que o desvio padrão das 2.000 séries atinge o menor valor quando a velocidade é 1, ou seja, quando a inclinação da reta de tendência formada pelos dados históricos é 45° ou 135° .

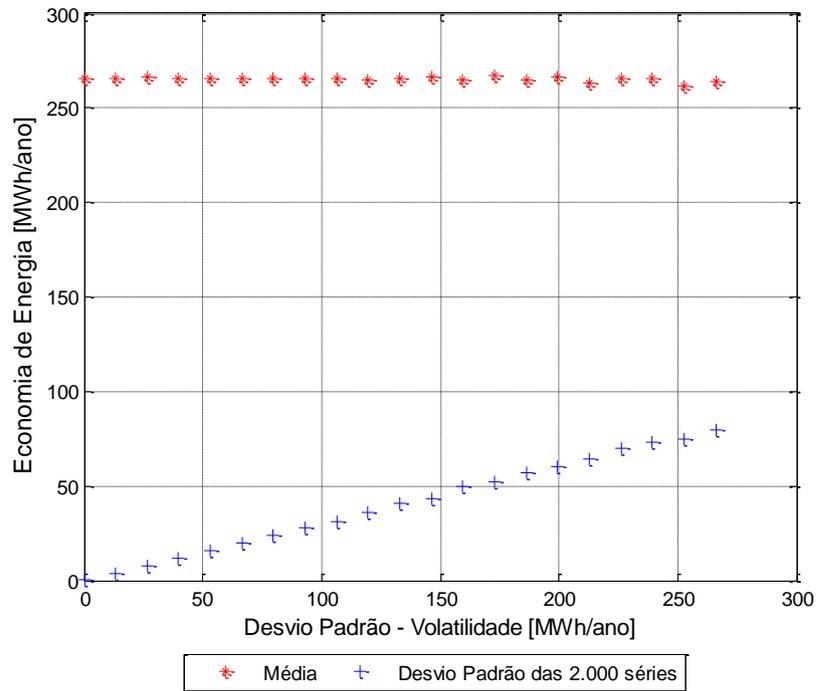


Figura 30: Média e desvio padrão dos valores de economia de energia variando-se σ

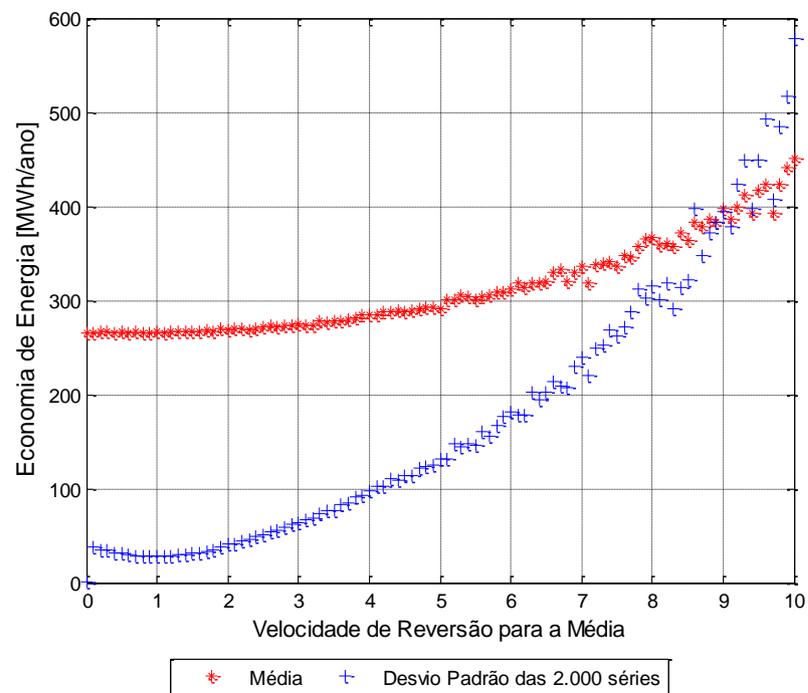


Figura 31: Média e desvio padrão dos valores de economia de energia variando-se η

4.4 CONCLUSÃO

Primeiramente, algumas conclusões a respeito das definições estabelecidas pelo PIMVP necessárias antes da M&V puderam ser obtidas. A definição do período de linha de base

como um número pequeno de dias permite a viabilização econômica da M&V, como já mencionado. Porém, este período demonstrou ser muito curto para se verificar a correlação entre parâmetros-chave e a variável independente definida – temperatura ambiente – no estado de Goiás, uma vez que neste há pouca variação da temperatura em um curto período de tempo. Desta forma, para a realidade de localidades com características ambientais próximas a do estado de Goiás, dificilmente a análise de correlação entre potência elétrica consumida por chuveiro e temperatura ambiente resultará em critérios atendidos.

A fronteira de medição foi definida como o conjunto de circuitos de alimentação dos chuveiros, ou seja, isolando estes da instalação residencial. Uma vez que a instalação de medidores de energia junto aos chuveiros elétricos está sujeita a restrições de número de equipamentos, mão de obra e tempo para serviço buscou-se verificar a possibilidade de se considerar como fronteira de medição a residência como um todo, e conseqüentemente, utilizar a Opção C do PIMVP. Isto possibilitaria aumentar significativamente o número de amostras, uma vez que bastaria realizar as leituras dos medidores de consumo de energia elétrica das residências em períodos programados, de forma coordenada com a instalação dos sistemas de aquecimento solar. Porém, devido à necessidade de se garantir que ao longo das medições antes e depois da instalação do SAS não haja mudanças significativas no número e consumo de eletrodomésticos e no número de pessoas que utilizam a residência, somadas à impossibilidade de se obter dados para cálculo da redução da potência elétrica no horário de ponta, esta alternativa mostrou-se inviável.

Após a obtenção dos dados de medição, foi possível concluir que a Opção A do PIMVP é adequada para cálculos de economia de energia e redução de demanda de ponta obtida a partir de aquecimento solar de água em residências de baixa renda como AEE, uma vez que, dada a dificuldade de se atingir o critério de nível de precisão desejado para o parâmetro-chave tempo de banho, este é considerado como estimativa. Já o parâmetro-chave potência deve ter tal critério atingido, para que pelo menos um dos parâmetros-chave seja considerado como medição, envolvendo, se necessário, processo iterativo de aumento do número de amostras, conforme mencionado anteriormente.

Um detalhe importante observado no desenvolvimento do projeto é a necessidade de alinhamento dos períodos de medição com os períodos de instalação dos sistemas de aquecimento solar nas residências, através de comunicação sem falhas entre a concessionária e a empresa contratada para a instalação dos SAS. Esta dificuldade ocorreu no processo de medição do PEE Residencial Orlando de Moraes. Constatou-se que foram instalados sistemas de aquecimento solar de água em residências que se encontravam com medidor de energia

acoplado ao chuveiro elétrico, o que fez com que estas medições fossem descartadas. Este planejamento de datas é importante também no sentido de haver tempo hábil para medições do período de linha de base que venham a ser necessárias no caso de não atendimento ao critério de nível de precisão desejado. No mesmo PEE mencionado, este critério não foi atingido para os parâmetros-chave, porém não foi possível aumentar o número de amostras devido à instalação de sistemas de aquecimento solar ter sido finalizada antes desta constatação.

Com relação às planilhas utilizadas (Planilha Auxiliar e Planilha Principal) a automatização dos cálculos através das fórmulas e funções matemáticas fixadas otimiza sua utilização, porém algumas destas necessitam de alteração dependendo do número de amostras ou da unidade de medida dos dados de medição nelas alimentados, além do fato de que alguns campos podem dificultar o entendimento e proporcionar erros por parte do usuário, da maneira como estão descritos nas planilhas.

A análise comparativa dos resultados de economia de energia elétrica dos três estudos de caso mostrou a importância da aplicação de questionários e levantamento de informações a respeito das famílias e das residências da amostra de um PEE nos períodos de linha de base e de determinação da economia, para que sejam levadas em consideração as condições e especificidades de cada localização.

Conclui-se, também, que a economia de energia elétrica com a AEE possui grande potencial de proporcionar benefícios expressivos quando se trata de economia financeira para famílias de baixa renda, como pode ser observado nos estudos de caso envolvendo os PEE Residencial Real Conquista e Município de Itumbiara. Também é grande o potencial de benefício para o sistema elétrico com a redução na demanda de ponta obtida, já que o custo desta pode ser menor que o custo de geração elétrica, considerando-se o grande número de residências contempladas pela AEE em conjuntos habitacionais em que residem famílias de baixa renda.

Os elevados valores de incerteza verificados refletem a dispersão dos valores de medição que impactam na incerteza de amostragem, principalmente em relação ao PEE Orlando de Moraes, uma vez que a incerteza de modelagem não foi considerada e a incerteza de medição é muito próxima para todos os casos. Este impacto da incerteza de amostragem em valores altos de incerteza combinada reforça a importância de se obter nível de precisão adequado para a amostragem selecionada.

A metodologia de previsão de cenários futuros através de modelagem estocástica seguindo o MGB com reversão para a média e simulação de Monte Carlo para obtenção das

séries temporais já é consolidada em determinadas aplicações práticas e científicas. São apresentadas conclusões a respeito da verificação da aplicação de tal metodologia para previsões de economia de energia elétrica obtida a partir de PEE envolvendo aquecimento solar de água em habitações de famílias de baixa renda, como forma de análise preventiva dos efeitos da AEE no longo prazo.

A partir dos dados de entrada apresentados na Tabela 26, obtém-se o comportamento da variável aleatória Economia Anual de Energia Elétrica, representado pelo conjunto de séries temporais ao longo do tempo, conforme a Figura 25 e a Figura 26, e representado pela evolução da FDP da variável aleatória ao longo do tempo, conforme a Figura 27, obtendo-se assim a projeção desta variável aleatória em um horizonte de 10 anos.

A análise de sensibilidade realizada permite a obtenção do comportamento da economia anual de energia elétrica a partir dos possíveis valores adotados para a volatilidade e para a velocidade de reversão para a média, uma vez que não há ainda dados históricos para a obtenção destes. A grande diferenciação nos resultados tanto da amplitude (Figura 28) como da média e desvio padrão calculados a partir dos valores das 2.000 séries (Figura 29, Figura 30 e Figura 31) evidenciada nesta análise de sensibilidade destaca a importância de se buscar a adoção de valores para as constantes componentes da equação estocástica a partir de dados históricos.

A aplicação da metodologia de simulação envolvendo modelagem estocástica para previsões futuras de economia de energia elétrica a partir de PEE em caráter experimental leva à conclusão de que a confiabilidade desta utilização está condicionada à obtenção de dados históricos para os parâmetros mencionados, dada a variação brusca dos resultados obtidos a partir de seus diferentes valores. Conforme resultados de economia de energia provenientes de M&V em PEE forem obtidos, é possível que seja constituído conjunto de dados históricos suficientes para que a correta atribuição de valores de volatilidade do passeio aleatório e de velocidade de reversão para média à modelagem estocástica.

5 CAPÍTULO V – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em estudos envolvendo a aplicação de metodologia recentemente desenvolvida, o caráter experimental permite percepções que resultam em contribuições para a melhoria ou facilidade do entendimento e utilização prática desta. De grande contribuição são também as dúvidas e dificuldades que surgem ao longo do processo de aplicação da metodologia, dada a necessidade da busca por informações e soluções.

Primeiramente, em relação ao objetivo específico que consiste em realizar diagnóstico e apontar contribuições para melhoria no procedimento de Medição e Verificação (M&V) adaptado do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP), são apresentadas conclusões a respeito da aplicação desta metodologia nos Projetos de Eficiência Energética (PEE) envolvendo aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda que compõem os estudos de caso deste trabalho. São obtidas, assim, contribuições para próximas aplicações em PEE da CELG-D e demais distribuidores de energia elétrica do Brasil.

A partir dos resultados obtidos para o nível de precisão da amostragem e para a incerteza combinada nos estudos de caso deste trabalho, destaca-se a importância do planejamento da medição considerando-se o processo de obtenção de amostragem.

A adoção do maior número de amostras obtido através das duas estimativas mencionadas, ou seja, através da NBR 5426 e das expressões fornecidas pelo PIMVP aumenta as chances de se atingir o nível de precisão requerido sem a necessidade de medição adicional. Caso haja restrições de número de medidores para se respeitar a amostragem inicial definida, é necessário considerar no planejamento do processo de M&V períodos de medição complementar.

O acompanhamento das etapas de M&V no PEE Orlando de Moraes também possibilitou conclusão a respeito da importância do alinhamento dos períodos das etapas de um PEE, mais especificamente em relação aos períodos de medição na linha de base e de instalação do sistema de aquecimento solar de água nas residências, a fim de se evitar a perda de amostras causada pela instalação do sistema de aquecimento ao longo do período de medição dos parâmetros chaves referentes ao chuveiro elétrico, o que também prejudica a obtenção do nível de precisão de amostragem requerido para a confiabilidade dos resultados.

A definição do período de linha de base como um número pequeno de dias permite a viabilização econômica da M&V, mas para características climáticas como a do estado de Goiás, este período se reflete insuficiente para se verificar a correlação entre parâmetros-

chave e a variável independente definida – temperatura ambiente, uma vez que neste há pouca variação da temperatura em um curto período de tempo. Não que isto seja um problema para quantificação da economia de energia elétrica resultante da Ação de Eficiência Energética (AEE), uma vez que a verificação da correlação tem função justamente de se retirar o impacto da temperatura ambiente nos dados de medição, mas, considerando-se que há diferença dos valores desta variável ao longo do ano, o consumo de energia médio diário evitado propagado para o horizonte de um ano pode divergir do valor que seria mais adequado, ao se considerar a sazonalidade. Nestas localidades, o ideal seria distribuir a medição em chuveiros elétricos das residências de baixa renda em pelo menos dois períodos do ano, abrangendo os extremos da sazonalidade da temperatura ambiente.

Os resultados apresentados para o PEE Residencial Orlando de Moraes também reforçam a importância de trabalhos futuros envolvendo o desenvolvimento de metodologia de propagação para o ano completo da economia de energia e redução na demanda de ponta verificada em determinado período do ano, considerando-se assim a sazonalidade regional. As medições realizadas no mês de outubro neste estudo de caso podem ser consideradas atípicas, pois os valores médios dos parâmetros chaves mostraram-se significativamente abaixo dos valores obtidos nos demais estudos de caso.

A utilização da Opção C do PIMVP, considerando-se como fronteira de medição a residência como um todo possibilitaria o aumento significativo do número de amostras, uma vez que bastaria realizar as leituras dos medidores de consumo de energia elétrica das residências em períodos programados. Porém, a necessidade de controle rigoroso dos fatores estáticos nas residências selecionadas como amostras, somada à dificuldade de se obter dados para cálculo da redução da potência elétrica no horário de ponta, faz com que esta alternativa se mostre inviável. Assim, a Opção A do PIMVP mostra-se a mais adequada para verificação de economia de energia e redução de demanda de ponta a partir de PEE que contemplem aquecimento solar de água em residências de baixa renda, uma vez que, dada a dificuldade de se atingir o critério de nível de precisão desejado para o parâmetro-chave tempo de banho, este é considerado como estimativa.

São também apontadas algumas contribuições em relação às planilhas disponibilizadas às concessionárias de distribuição de energia elétrica para as avaliações de seus PEE cuja AEE é o aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda, no sentido de evitar determinados erros de utilização por parte do usuário.

Para o processo de medição para obtenção dos parâmetros-chave em PEE futuros, recomenda-se a utilização de medidores cujo registro de energia seja feito em intervalos

menores do que 5 minutos, no sentido de evitar superestimativa ou subestimativa dos parâmetros chaves, o que contribui para maior confiabilidade dos resultados de economia de energia elétrica e redução na demanda de ponta, sem deixar de se considerar o equilíbrio entre custo e benefício destacado pelo PIMVP.

Com relação à economia de energia elétrica mensal que a AEE proporciona às famílias residentes das unidades habitacionais contempladas, que corresponde a um dos objetivos específicos deste trabalho, verifica-se que tal economia representa aproximadamente 10%, 60% e 62% do consumo médio mensal de energia em residências de baixa renda no estado de Goiás, a partir dos PEE Residencial Orlando de Moraes, Residencial Real Conquista e Itumbiara, respectivamente. Considerando-se os dois últimos, estes resultados são expressivos quanto se trata de economia financeira para famílias de baixa renda. Esta pode contribuir significativamente para melhoria na qualidade de vida das famílias, pelo menos ao amenizar os gastos com energia elétrica, dado aumento significativo destes no ano de 2015.

Do ponto de vista dos benefícios para o sistema elétrico obtidos a partir de PEE envolvendo aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda, também se verifica a possibilidade de postergação de investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em consequência de redução na demanda de energia no horário de ponta, como resposta ao objetivo específico do trabalho relacionado. Verificou-se que as reduções obtidas com os PEE Residencial Orlando de Moraes, Residencial Real Conquista e Itumbiara, em relação à demanda máxima no estado de Goiás em 2014 representam 0,002%, 0,005% e 0,015%, respectivamente.

Considerando-se estimativa feita com todas as residências contempladas no PEE nº 883 cadastrado na ANEEL, a redução representa 0,054% da demanda máxima no horário de ponta no estado de Goiás em 2014. Como apresentado no Capítulo IV, o custo desta redução de demanda no horário de ponta é menor do que os custos de geração elétrica nos dois cenários apresentados, ou seja, a partir de usinas contempladas nos leilões de energia nova e a partir de fontes térmicas somente, tendo estas últimas participação significativa na geração elétrica nacional recentemente, fruto da menor disponibilidade de água em reservatórios em fontes hídricas de geração.

A economia anual de energia elétrica obtida a partir do aquecimento solar de água em PEE é propagada ao longo dos anos enquanto a AEE produzir efeitos nas residências. A previsão de cenários futuros de economia de energia elétrica é feita neste estudo através do processo estocástico Movimento Geométrico Browniano com reversão para a média, sendo apresentadas as séries temporais obtidas, a partir de valores atribuídos a constantes

componentes da expressão estocástica, como resultados referentes ao objetivo específico relacionado.

Também são apresentados os comportamentos da amplitude, média e desvio padrão dos valores simulados de Economia Anual de Energia Elétrica para um ano futuro, a partir da análise de sensibilidade dos valores atribuídos às constantes que representam a volatilidade e a velocidade de reversão para a média, obtendo-se, desta forma, maior representação das possíveis situações futuras de economia de energia elétrica. Esta etapa do estudo mostra que a previsão por processos estocásticos do consumo de energia elétrica evitado por um PEE ao longo de determinado horizonte é possível. Porém, são necessárias contribuições de novos estudos para que a modelagem represente de forma mais fiel à situação específica, por exemplo, através da atribuição de valores de velocidade de reversão para a média e de volatilidade do passeio aleatório a partir de dados históricos obtidos através de PEE que venham a ocorrer.

Conforme disposto ao longo da dissertação, o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho foram atingidos. Os PEE envolvendo aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda resultam em economia de energia elétrica para as famílias, a qual pode representar um benefício significativo, em termos de economia financeira ou amenização do aumento dos valores monetários das contas de energia elétrica que vêm ocorrendo recentemente no país.

Quanto aos procedimentos adaptados PIMVP, estes se mostram uma boa metodologia de M&V e cálculo de economia de energia e redução de demanda de ponta, sendo necessários alguns cuidados já destacados e maior aplicação prática para que novas contribuições sejam evidenciadas. Apesar de a redução na demanda de ponta do estado de Goiás obtida ter sido baixa, em termos percentuais em relação à demanda máxima no ano de 2014, pode-se concluir que, somada à redução obtida com AEE de outros usos finais em PEE, como a troca de lâmpadas e eletrodomésticos por outros mais eficientes, há contribuição para a postergação ou realocação de investimentos por parte da CELG-D em distribuição de energia elétrica.

Por fim, conclui-se que a sociedade é beneficiada com a AEE, considerando-se as economias evidenciadas e a redução de impactos ambientais associados com a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como já mencionado, as contribuições de melhoria obtidas a partir de estudos envolvendo a aplicação de metodologia recentemente desenvolvida são de grande valia. Neste contexto, considerando-se a busca por resultados em estudos envolvendo eficiência energética, aquecimento solar de água e melhoria de condições econômico-financeiras para famílias de baixa renda, são apresentadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

Quanto às definições estabelecidas pelo PIMVP necessárias antes da M&V, é possível avaliar a consideração de outros efeitos interativos fora da fronteira de medição que afetem o consumo de energia por chuveiros elétricos. A identificação e consideração destes resultaria em maior confiabilidade dos resultados de economia de energia e redução da demanda de ponta.

Uma vez que dificilmente a análise de correlação entre potência elétrica consumida por chuveiro e temperatura ambiente resultará em critérios atendidos, considerando-se a realidade de localidades com características ambientais próximas a do estado de Goiás, conforme já mencionado, seria de grande importância estudos envolvendo medição em período de linha de base maior, de preferência considerando-se um ano, a fim de se considerar a sazonalidade atrelada a cada época do ano.

Os resultados obtidos do possível estudo de longo prazo seriam de grande contribuição para se desenvolver metodologia de propagação dos dados de medição obtidos em curtos períodos de linha de base e de determinação da economia para demais períodos do ano, o que contribui também para melhor comparação de resultados de PEE que contemplem aquecimento solar de água em residências de famílias de baixa renda, pois, conforme verificado, a comparação entre os resultados obtidos com diferentes PEE cuja medição ocorreu em diferentes períodos do ano pode ser prejudicada pela sazonalidade.

Por fim, a partir de dados futuros que venham a ser obtidos com PEE envolvendo aquecimento solar de água em unidades habitacionais de família de baixa renda, recomenda-se estudo para obtenção de valores das constantes velocidade de reversão para a média (η) e volatilidade (σ) do passeio aleatório, com o fim de aplicação em projeções de séries temporais sintéticas a partir de processos estocásticos de simulação. Levanta-se também a necessidade de consideração do desgaste dos equipamentos do SAS ao longo do tempo, o qual pode ser considerado como uma nova constante determinística na modelagem utilizada para a simulação.

REFERÊNCIAS

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S/A. **Energia Solar para aquecimento de água do Brasil: Contribuições da Eletrobrás Procel e Parceiros.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2012.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL E COMBATE À FOME. **Cadastro Único para Programas Sociais do Governo Federal.** 2014. Disponível em: <http://www.mds.gov.br/bolsafamilia/cadastrounico>.

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

CARDOSO, Rafael B.; NOGUEIRA, Luiz Augusto H. **Estimativa dos impactos energéticos e ambientais atribuída aos coletores solares térmicos nas residências brasileiras.** PCH Notícias & SHP News, n. 49, abr./mai./jun. 2011.

EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance: Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água. Volume 1.** Toronto: EVO, 2012 .

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Guia de Medição e Verificação para Programa de Eficiência Energética Regulado pela ANEEL.** Brasília: ANEEL, 2014 - a.

CHRISTENSEN, Craig; BURCH, Jay. **Monitoring Approaches for Utility Solar Water Heating Projects.** The 1994 American Solar Energy Society Annual Conference. 1994.

DE BOD, A.; GROBLER, L. J.; DE VILLIERS, P.A. **Measurement and verification methodology, challenges and lessons learned of M&V on commercial heat pumps.** Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE), 2012 Proceedings of the 9th, 2012.

BARNARD, F. C.; GROBLER, L. J. **Baseline Service Level Adjustment Methodologies for Energy Efficiency Projects on Compressed Air Systems in the Mining Industry.** Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE), 2012 Proceedings of the 9th, 2012.

KAISER, Mark J; PULSIPHER, Allan J. **Preliminary assessment of the Louisiana Home Energy Rebate Offer program using IPMVP guidelines.** Elsevier: Applied Energy, v. 87, p. 691-702, 2010.

FONSECA, Eduardo V. D. N. **Comparação entre simulações pelo Movimento Geométrico Browniano e Movimento de Reversão à Média no cálculo do Fluxo de Caixa *at Risk* do departamento de *downstream* de uma empresa de petróleo.** Dissertação de Mestrado, Instituto COPPEAD de Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Amostragem descritiva no apreçamento de opções europeias através de simulação de Monte Carlo: o efeito da dimensionalidade e da probabilidade de exercício no ganho de precisão.** Brasília: BACEN, 2007.

DOZZA, Marco A. **Determinantes de valor: teoria de opções reais por simulação de Monte Carlo com mínimos quadrados.** Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial, v. 4, n. 7, p. 68-80, 2012.

DOMINGUES, Elder G. **Análise de risco para otimizar carteiras de ativos físicos em geração de energia elétrica.** Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2003.

SARAIVA JÚNIOR, Abraão F; RODRIGUES, Maxwell V; DA COSTA, Reinaldo P. **Simulação de Monte Carlo aplicada à decisão de *mix* de produtos.** Produto & Produção, v. 11, n. 2, p. 26-54, jun 2010.

GARCIA, Solange; LUSTOSA, Paulo R. B; BARROS, Nara R. **Aplicabilidade do método de simulação de Monte Carlo na previsão dos custos de produção de companhias**

industriais: o caso da companhia do Vale do Rio Doce. RCO – Revista de Contabilidade e Organizações – FEA-RP/USP, v. 4, n. 10, p. 152-173, set-dez 2010.

VILCAPOMA, Aníbal A. I; MOURA, Luize de M; SAMPAIO, Léa M. D. **Uso da simulação de Monte Carlo em projetos de construção de rodovias no norte fluminense.** XVII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, v. 1, n. 1, ago 2014.

DONATELLI, Gustavo D; KONRATH, Andréa C. **Simulação de Monte Carlo na avaliação de incertezas de medição.** Revista de Ciência e Tecnologia, v. 13, n. 25/26, p. 5-15, 2005.

YORYAZ, Hélio. **Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em física médica.** Revista Brasileira de Física Médica, 3(1): 141-9, 2009.

MADEIRA, Guilherme S. **Análise do uso de sistemas de aquecimento solar de água em habitações de interesse social.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do ABC. Santo André, 2013.

HELIOTEK BOSCH GROUP. Disponível em: <http://www.heliotek.com.br>. Acesso em: 08 de outubro de 2014.

JAMP ENERGIA LIMPA. Disponível em: <http://www.aquakent.com.br>. Acesso em: 08 de outubro de 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2013.Edition 2015.** Gleisdorf, Austria: IEA, 2015 .

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030.** Brasília: MME, 2008 - b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE.** Brasília: ANEEL, 2014 - b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Plano de M&V para Aquecimento de Água em Baixa Renda.** Brasília: ANEEL, 2014 - c.

CABRAL, Paulo. **Erros e Incertezas nas Medições.** Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2004.

MORETTIN, Pedro A.; TOLOI, Clélia Maria de C. **Séries temporais.** São Paulo: Atual Editora Ltda., 1987.

BRAUMANN, Carlos A. **Introdução às equações diferenciais estocásticas e aplicações.** Ericeira: Edições SPE, 2005.

ANDERSON, David R.; SWEENEY, Dennis J.; WILLIAMS, Thomas A. **Estatística aplicada à administração e economia.** Trad. SANTOS, José Carlos B. São Paulo: Editora CENGAGE, 2008.

TRABALHOS PUBLICADOS EM ANAIS DE EVENTOS

MENITA, Bruno G.; DOMINGOS, José L.; DOMINGUES, Elder G; ALVES, Aylton J.; CALIXTO, Wesley P.; GARCIA, Agenor G. P.; DE FARIA, Adriano F.; MIGUEL, Marcio S. L. **Measurement and Verification in Energy Efficiency Projects involving Solar Water Heating Systems in Homes of Low-Income Families – Case Studies.** IEEE Chilecon 2015, Santiago, Chile, October 2015.

TRABALHOS ACEITOS PARA APRESENTAÇÃO EM EVENTOS

MENITA, Bruno G.; DOMINGOS, José L.; DOMINGUES, Elder G; ALVES, Aylton J.; CALIXTO, Wesley P. **Stochastic Modelling Applied to Prediction of Electricity Saving by using Solar Water Heating Systems for Low-Income Families.** ICREPQ 2016, Madrid, Spain, May 2016.

**APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO PARA OBTENÇÃO DA
MODELAGEM ESTOCÁSTICA DO MGB COM REVERSÃO PARA A MÉDIA**

A partir da expressão que representa o processo de Itô para uma função $F(a,t)$ diferenciável no mínimo duas vezes em a – variável aleatória – e uma vez em t – tempo, considerando-se que a variável aleatória segue uma distribuição log-normal, ou seja, as variações no logaritmo da variável aleatória seguem uma distribuição normal, como explicado no Capítulo III, tem-se que:

$$dF = \left[\frac{\partial F}{\partial t} + \mu(a, t) \cdot \frac{\partial F}{\partial a} + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2(a, t) \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial a^2} \right] \cdot dt + \sigma(a, t) \cdot \frac{\partial F}{\partial a} \cdot dz$$

onde,

- μ = constante que representa a tendência da série temporal;
- σ = constante que representa a volatilidade do passeio aleatório (ruído branco).

$$F(a) = \ln a$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial a} = \frac{1}{a}; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial a^2} = \frac{-1}{a^2}$$

$$dF = \left[0 + \mu(a, t) \cdot \frac{1}{a} + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2(a, t) \cdot \frac{-1}{a^2} \right] \cdot dt + \sigma(a, t) \cdot \frac{1}{a} \cdot dz$$

Para o caso específico do Processo de Itô que identifica o Movimento Geométrico Browniano:

$$dF = \left[0 + \mu \cdot a \cdot \frac{1}{a} + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot a^2 \cdot \frac{-1}{a^2} \right] \cdot dt + \sigma \cdot a \cdot \frac{1}{a} \cdot dz$$

$$dF = \left(\mu - \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \right) \cdot dt + \sigma \cdot dz$$

Como $F(a) = \ln a$, a versão discreta da expressão do MGB é:

$$\ln a_{t+1} - \ln a_t = \left(\mu - \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \right) \cdot \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t}$$

onde,

- φ = variável randômica com distribuição normal padronizada – N(0,1).

Logo:

$$a_{t+1} = a_t \cdot e^{\left[\left(\mu - \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \right) \cdot \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t} \right]}$$

O processo aritmético de Ornstein-Uhlenbeck para uma variável estocástica, contemplado na expressão de modelagem do MGB com reversão para a média possui como termo determinístico – tendência:

$$E_t[da_t] = \eta \cdot (\bar{a} - a_t) \cdot dt$$

onde,

- η = velocidade de reversão dos valores da variável aleatória ao longo do tempo para a média (ponto de partida).

Substituindo o termo determinístico acima na expressão de modelagem estocástica do MGB, tem-se a expressão que representa a modelagem estocástica de reversão para a média:

$$\ln a_{t+1} - \ln a_t = \left[\eta \cdot (\bar{a} - a_t) - \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \right] \cdot \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t}$$

Logo,

$$a_{t+1} = a_t \cdot e^{\left\{ \left[\eta \cdot (\ln \bar{a} - \ln a_t) - \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \right] \cdot \Delta t + \sigma \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta t} \right\}}$$

ANEXO A – QUESTIONÁRIO APLICADO EM RESIDÊNCIAS DO PEE

LEVANTAMENTO DE CARGA					
Data: ____/____/____			PESQUISA nº _____		
LOCALIDADE: GOIÂNIA - GO			SETOR:		
UC:			MEDIDOR:		
NOME:				Medidor DC-SUE	
ENDEREÇO:					
CONDIÇÕES GERAIS					
QUANTIDADE DE CASAS NO MESMO LOTE? () 01 () 02 () 03 () OUTROS					
CONDIÇÕES DA GELADEIRA () RUIM () REGULAR () BOM () ÓTIMA					
IDADE DA GELADEIRA:		MARCA:		TENSÃO:	
POTÊNCIA E/OU CONSUMO DECLARADA:			POTÊNCIA MEDIDA:		
QUANTIDADE DE CÔMODOS? () 01 () 02 () 03 () 04 () 05 () OUTROS					
QUANTIDADE DE PESSOAS? () 01 () 02 () 03 () 04 () 05 () OUTROS					
LEVANTAMENTO DE CARGA					
EQUIPAMENTO	QTDE	POTÊNCIA		CONSUMO	
		WATTS	CV/BTU	HORAS	DIAS
APARELHO DE SOM					
CHAPINHA-PIASTRA					
CHUVEIRO POSIÇÃO INVERNO					
CHUVEIRO POSIÇÃO VERÃO					
DVD/ VÍDEO CASSETE					
EXAUSTOR					
FERRO ELÉTRICO					
FERRO ELÉTRICO A VAPOR					
FORNO ELÉTRICO					
FORNO MICROONDAS					
FREEZER					
IMPRESSORA					
LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA 1					
LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA 2					
LÂMPADA INCANDESCENTE 1					
LÂMPADA INCANDESCENTE 2					
LÂMPADA TUBULAR					
LAVADOURA DE ROUPAS					
LIQUIDIFICADOR					
MICROCOMPUTADOR - MONITOR					
SECADOR DE CABELO					
TANQUINHO					
TV 14 POLEGADAS					
TV 21 POLEGADAS					
TV 29 POLEGADAS					
TV 32 POLEGADAS					
VENTILADOR/CIRCULADOR					

ANEXO B – PLANILHA AUXILIAR E SEUS COMPONENTES DE ALIMENTAÇÃO E DE CÁLCULO

Amostra 39 (a) UC 17358980	Residência 4 (b) Dia 6 (c)	39.000 (d)	Dia 40 UC 17358980	Resid. 4 Dia 6	40.000	Dia 41 UC 17358980	Resid. 4 Dia 6	41.000		
Diário			Diário			Diário				
Contagem de tempo	Início 1 Meio 2 Fim 3	4 7 4	Contagem de tempo	Início 1 Meio 2 Fim 3	7 1 6 (i)	Contagem de tempo	Início 1 Meio 2 Fim 3	7 4 7		
kWh total 2.43 kWh	Banhos 4		kWh total 1.89 kWh (j)	Banhos 7 (k)		kWh total 2.88 kWh	Banhos 7			
Início 24/06/2010 00:00	Util		Início 25/06/2010 00:00	Util (l)		Início 26/06/2010 00:00	Não útil			
Fim 24/06/2010 23:55 (e)	kW máx 3.86		Fim 25/06/2010 23:55	kW máx 2.57 (m)		Fim 26/06/2010 23:55	kW máx 3.84			
Intervalo 0:05	Minutos 55		Intervalo 0:05	Minutos 38 (n)		Intervalo 0:05	Minutos 55			
Temp 24.9 °C	Min/banho 13.8		Temp 24.1 °C (o)	Min/banho 5.4 (p)		Temp 22.5 °C	Min/banho 7.9			
Mês 6	kW médio 2.6520		Mês 6	kW médio 3.0240 (q)		Mês 6	kW médio 3.1440			
kW mínimo 0.1 (f)			kW mínimo 0.1			kW mínimo 0.1				
Horário de Ponta			Horário de Ponta			Horário de Ponta				
Contagem de tempo	Início 1 Meio 2 Fim 3	2 4 2	Contagem de tempo	Início 1 Meio 2 Fim 3	6 1 4 (i)	Contagem de tempo	Início 1 Meio 2 Fim 3	0 0 0		
Demanda ponta 0.431 kW	Banhos 2		Demanda ponta 0.559 kW (r)	Banhos 6 (k)		Demanda ponta	Banhos			
kWh total 1.3 kWh	Minutos 30		kWh total 1.7 kWh (j)	Minutos 30 (n)		kWh total 0.0 kWh	Minutos			
FCP 53%	Min/banho 15.0		FCP 89% (s)	Min/banho 5.0 (p)		FCP	Min/banho			
Períodos ponta 36	kW médio 2.6		Períodos ponta 36 (t)	kW médio 3.4 (q)		Períodos ponta 0	kW médio			
Hora	kW	Ponta	Temp	Banhos		Hora	kW	Ponta	Temp	Banhos
19:15	0,00 (g)	0,00	24,9 (h)		1.674	19:15	0,00	FP	22,5	
19:20	0,00	0,00	24,9		1.675	19:20	0,00	FP	22,5	
19:25	0,14	0,14	24,9	1	1.676	19:25	1,56	FP	22,5	1
19:30	3,72	3,72	24,9	2	1.677	19:30	1,57	FP	22,5	3
19:35	3,01	3,01	24,9	2	1.678	19:35	0,00	FP	22,5	
19:40	2,56	2,56	24,9	2	1.679	19:40	0,00	FP	22,5	
19:45	0,78	0,78	24,9	2	1.680	19:45	0,00	FP	22,5	
19:50	1,62	1,62	24,9	3	1.681	19:50	3,62	FP	22,5	1
19:55	0,00	0,00	24,9		1.682	19:55	1,46	FP	22,5	3
20:00	0,00	0,00	24,9		1.683	20:00	0,00	FP	22,5	
20:05	0,00	0,00	24,9		1.684	20:05	0,00	FP	22,5	
20:10	2,27	2,27	24,9	1	1.685	20:10	0,00	FP	22,5	
20:15	1,42	1,42	24,9	3	1.686	20:15	0,00	FP	22,5	
20:20	0,00	0,00	24,9		1.687	20:20	0,00	FP	22,5	
20:25	0,00	0,00	24,9		1.688	20:25	0,00	FP	22,5	

Resumo do Currículo Lattes

Endereço para acessar (<http://lattes.cnpq.br/2791668517294238>)

Possui graduação em Engenharia de Produção Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2009) e mestrado profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Goiás (2015), sendo a área de concentração Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa e a linha de pesquisa Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada. Atualmente é pesquisador-tecnologista em metrologia e qualidade do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.