



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

VANESSA COSTA SANTOS

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DOMÉSTICOS  
DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM USO:  
UMA ABORDAGEM DAS INTERFACES COM O USUÁRIO E  
O AMBIENTE CONSTRUÍDO**

VANESSA COSTA SANTOS

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DOMÉSTICOS  
DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM USO:  
UMA ABORDAGEM DAS INTERFACES COM O USUÁRIO E  
O AMBIENTE CONSTRUÍDO**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thalita Gorban Ferreira Giglio

Londrina  
2019

VANESSA COSTA SANTOS

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DOMÉSTICOS DE  
AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA EM USO:  
UMA ABORDAGEM DAS INTERFACES COM O USUÁRIO E O  
AMBIENTE CONSTRUÍDO**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thalita Gorban Ferreira  
Giglio  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Miriam Jerônimo Barbosa  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Daniel Setrak Sowmy  
Universidade de São Paulo - USP

Londrina, 22 de agosto de 2019.

*“A vida se contrai ou se expande na proporção de nossa coragem.” Anaïs Nin*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela força e proteção ao longo desse ciclo;

Aos meus pais, Normalene e Marivaldo, e minha irmã Natália, pelo amor incondicional e suporte à minha trajetória;

À minha orientadora Prof. Thalita Giglio, por quem tenho grande apreço, sempre generosa, paciente e assertiva;

Aos professores Miriam Barbosa e Daniel Sowmy pelas contribuições feitas a esta pesquisa;

Ao professor e pesquisador Abel Silva Viera, pela orientação no tratamento das simulações computacionais;

Aos meus amigos Mayne e Maurício, a distância e o tempo provaram-se irrelevantes perto de nossa cumplicidade;

Às companheiras de estudo e amigas Rafaela, Nádia, Jéssica e Celis, pelo suporte e acolhimento;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro concedido durante esta pesquisa.

SANTOS, Vanessa Costa. **Desempenho energético de sistemas domésticos de aquecimento solar de água em uso: uma abordagem das interfaces com o usuário e o ambiente construído**. 2019. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

## RESUMO

A inclusão da energia solar térmica nas edificações tem crescido em todo o mundo como uma consequência do aumento da demanda por energias renováveis. No que tange os sistemas domésticos de aquecimento solar de água (SAS), os benefícios associados ao seu uso compreendem não apenas a economia de energia elétrica proporcionada ao usuário, mas ainda a redução da demanda de energia nos horários de pico pelo setor residencial. Embora essa tecnologia esteja consolidada, há uma carência de estudos que abordem os efeitos de sua interação com o usuário e o ambiente construído no desempenho do SAS. Nessa perspectiva, este trabalho apresenta uma avaliação do desempenho de sistemas domésticos de aquecimento solar de água com enfoque nas interfaces com o ambiente construído e o usuário. O estudo busca uma abordagem das situações reais de limitações impostas aos SAS pelo ambiente construído. O objetivo foi atingido a partir de uma análise de sensibilidade multiparamétrica aplicada para identificar os parâmetros de natureza construtiva e operacional que sensibilizam o desempenho destes sistemas. O estudo foi realizado por meio de simulações computacionais no programa EnergyPlus, utilizando-se a fração solar e o consumo anual de energia como indicadores de desempenho. O modelo desenvolvido foi validado a partir de dados medidos e apresentou bom nível de conformidade, com erro médio de 8,6%. A localização do tanque de armazenamento na cobertura, a inclinação e a orientação dos coletores solares foram definidas como condições limitantes do SAS. A partir delas, foram analisados os efeitos da variação de nove parâmetros, entre construtivos e operacionais, nos indicadores de desempenho de SAS utilizados em três cidades representativas do território brasileiro: Belém, São Paulo e Porto Alegre. A orientação do coletor demonstrou ser a limitação construtiva mais crítica para o desempenho do SAS. As discrepâncias no consumo de energia elétrica entre orientações distintas alcançaram 45 e 60% em Porto Alegre e São Paulo, respectivamente. Nas três cidades, os parâmetros construtivos relação  $V_{ar}/A_{col}$  e volume do tanque apresentaram maior influência nos indicadores de desempenho do SAS, proporcionando uma economia de até 284 kWh/ano em São Paulo, 235 kWh/ano em Porto Alegre, e consumo nulo em Belém. Entre os parâmetros operacionais, o nível de conforto do banho mostrou-se o mais influente no desempenho do SAS em São Paulo e Porto Alegre, e o horário de banho adotado pelo usuário, em Belém. Os resultados apontaram que ajustes adequados nas configurações destes parâmetros permitem compensar ou minimizar os efeitos das limitações construtivas.

**Palavras-chave:** Energia solar térmica. Economia de energia. Fração solar. Validação. Simulação computacional.

SANTOS, Vanessa Costa. **Energy performance of domestic solar water heating systems in use: an approach of the interfaces with the user and the built environment**. 2019. 124p. Dissertation (Mastering in Civil Engineering) – State University of Londrina, Londrina, 2019.

## ABSTRACT

The inclusion of solar thermal energy in buildings has grown worldwide because of the increased demand for renewable energy. Regarding domestic solar water heating systems (SAS), the benefits associated with their use include not only the electrical energy savings provided to the user, but also the reduction of energy demand at peak hours by the residential sector. Although this technology is consolidated, there is a lack of studies that address the effects of its interaction with the user and the environment built on SAS performance. From this perspective, this work presents an evaluation of the performance of domestic solar water heating systems focusing on the interfaces with the built environment and the user. The study seeks to approach the real situations of limitations imposed on the SAS by the built environment. The objective was reached through a multiparametric sensitivity analysis applied to identify the constructive and operational parameters that sensitize the performance of these systems. The study was carried out through computer simulations on the EnergyPlus program, using the solar fraction and the annual energy consumption as performance indicators. The model developed in the program was validated from measured data and presented good level of compliance, with an average error of 8.6%. The location of the storage tank on the roof, the slope and orientation of the solar collectors were defined as limiting conditions of the SAS. From these, the effects of the variation of nine parameters, between constructive and operational, on the SAS performance indicator were analyzed for three representative cities of the Brazilian territory: Belém, São Paulo and Porto Alegre. Collector orientation has proven to be the most critical constructive limitation for SAS performance. Discrepancies in energy consumption between different orientations reached 45 and 60% in Porto Alegre and São Paulo, respectively. In all three cities, the construction parameters  $V_{ar}/A_{col}$  Ratio and Tank Volume had the greatest influence on SAS performance indicators, providing savings of up to 284kWh/year in São Paulo, 235kWh/year in Porto Alegre, and zero consumption in Belém. Among the operational parameters, the Bath Comfort Level was the most influential in the SAS performance in São Paulo and Porto Alegre, and the bath time adopted by the user in Belém. The results showed that appropriate adjustments in the settings of these parameters allow to compensate or minimize the effects of constructive limitations.

**Keywords:** Solar thermal energy. Energy savings. Solar fraction. Validation. Computational simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das fontes de energia no aquecimento de água para banho nos domicílios.....	14
Figura 2 – Processos de conversão de energia.....	15
Figura 3 – Desenho esquemático de um sistema de aquecimento solar de água por termosifão.....	18
Figura 4 – Fluxograma de entradas e saídas para simulação de SAS no programa EnergyPlus.....	40
Figura 5 – Planta baixa de uma habitação de interesse social (sem escala).....	49
Figura 6 – Corte A (sem escala).....	49
Figura 7 – Desenho esquemático da modelagem de um SAS no programa EnergyPlus.....	55
Figura 8 – Desenho esquemático do método de configuração dos parâmetros para análise.....	67
Figura 9 – Gráfico comparativo dos resultados de temperatura de água quente para os dias de inverno.....	70
Figura 10 – Gráfico comparativo dos resultados de temperatura de água quente para os dias de verão.....	71
Figura 11 – Gráfico de radiação difusa para os dias de inverno.....	74
Figura 12 – Gráfico de radiação direta para os dias de inverno.....	74
Figura 13 – Gráfico de radiação difusa para os dias de verão.....	75
Figura 14 – Gráfico de radiação direta para os dias de verão.....	75
Figura 15 – Impacto da relação $V_{ar}/A_{col}$ na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.....	78
Figura 16 – Perdas de energia no tanque de armazenamento em São Paulo.....	80
Figura 17 – Perdas de energia no tanque de armazenamento em Belém.....	80
Figura 18 – Perdas de energia no tanque de armazenamento em Porto Alegre.....	80
Figura 19 – Impacto do volume de armazenamento na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.....	81
Figura 20 - Impacto da inclinação do coletor na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.....	83
Figura 21 - Impacto do horário de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.....	86
Figura 22 - Impacto do nível de conforto de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.....	89
Figura 23 – Impacto da localização do tanque de armazenamento na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.....	90
Figura 24 – Impacto do tipo de backup na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.....	92
Figura 25 - Coeficiente de Variação do consumo de energia por orientação em São Paulo.....	93
Figura 26 – Coeficiente de Variação do consumo de energia por orientação em Belém.....	94
Figura 27 – Coeficiente de Variação do consumo de energia por orientação em Porto Alegre.....	94
Figura 28 – Impacto da relação $V_{ar}/A_{col}$ na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.....	96
Figura 29 – Impacto do volume do tanque na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento.....	97
Figura 30 – Impacto do volume do tanque na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.....	117
Figura 31 – Impacto do horário de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.....	118
Figura 32 – Impacto do nível de conforto do banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.....	119
Figura 33 – Impacto da localização do tanque de armazenamento na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.....	120
Figura 34 – Impacto do backup na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.....	120

Figura 35 - Impacto da relação $V_{ar}/A_{col}$ na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento. ....	121
Figura 36 – Impacto do horário de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento. ....	122
Figura 37 – Impacto do nível de conforto do banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento. ....	123
Figura 38 – Impacto do tipo de backup na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento. ....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ângulo de inclinação e azimute ótimos para aquecedores solares de água.....	24
Tabela 2 – Características de tubulações de instalações de água quente.....	33
Tabela 3 – Espessura mínima de isolamento de tubulações para aquecimento de água.....	34
Tabela 4 – Programas para modelagem e simulação computacional. ....	39
Tabela 5 – Consumo de energia de chuveiros elétricos. ....	48
Tabela 6 – Classificação dos parâmetros do sistema. ....	50
Tabela 7 – Variações dos parâmetros de análise do sistema. ....	51
Tabela 8 – Cronograma de banhos.....	53
Tabela 9 – Temperatura do reservatório térmico do sistema monitorado.....	62
Tabela 10 - Cronograma de banhos registrados no SAS medido. ....	62
Tabela 11 – Configuração de referência da análise de sensibilidade.....	68
Tabela 12 – Diferença absoluta da temperatura de água entre a simulação e dados de medição. ....	72
Tabela 13 – Raiz do Erro Quadrático Médio relativo.....	76
Tabela 14 – Incremento no consumo de energia em função da melhor orientação para cada relação $V_{ar}/A_{col}$ . <sup>a</sup> 79	79
Tabela 15 – Redução no consumo de energia em função do volume de armazenamento de 200L.....	82
Tabela 16 – Consumo médio de energia (kwh) durante os meses de inverno em São Paulo.....	84
Tabela 17 – Consumo médio de energia (kwh) durante os meses de inverno em Belém. ....	84
Tabela 18 – Consumo médio de energia (kwh) durante os meses de inverno em Porto Alegre. ....	84
Tabela 19 – Aumento no consumo de energia em função do melhor horário de banho. ....	87
Tabela 20 – Crescimento no consumo de energia em função do incremento no nível de conforto de banho. ...	89
Tabela 21 – Economia de energia em SAS pela relocação do tanque de armazenamento abrigado dentro do ático. ....	91
Tabela 22 – Incremento no consumo de energia pela substituição do Aquecedor Instantâneo pelo Aquecedor de Acumulação. ....	92
Tabela 23 – Redução no consumo de energia mediante relocação do tanque de armazenamento no ático. ....	98
Tabela 24 – Condições climáticas gerais. ....	112
Tabela 25 – Radiação solar global no plano horizontal ( $W/m^2$ ). ....	112
Tabela 26 – Temperatura média ambiente em °C.....	113
Tabela 27 – Radiação solar difusa no plano horizontal em $W/m^2$ .....	115
Tabela 28 – Radiação solar direta no plano horizontal em $W/m^2$ .....	116

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	OBJETIVO GERAL	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>13</b>
2.1	SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA	13
2.2	SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA	17
2.2.1	<i>Coletor solar</i>	20
2.2.2	<i>Tanque de armazenamento</i>	25
2.2.2.1	Backup	30
2.2.2.2	Temperatura da água	31
2.2.3	<i>Circuitos hidráulicos</i>	33
2.2.4	<i>Usuário</i>	36
2.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	38
<b>3</b>	<b>METODO DE PESQUISA</b>	<b>45</b>
3.1	DELINEAMENTO DO OBJETO DE ESTUDO	45
3.1.1	<i>Características construtivas da habitação</i>	48
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS	50
3.3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA NO PROGRAMA ENERGYPLUS	54
3.4	VALIDAÇÃO DO MODELO DE SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR	59
3.4.1	<i>Descrição do sistema monitorado</i>	60
3.4.2	<i>Seleção dos dias de validação</i>	61
3.4.3	<i>Variáveis climáticas e particularidades da modelagem</i>	63
3.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE MULTIPARAMETRICA	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>70</b>
4.1	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO	70
4.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	77
4.2.1	<i>Limitação 01 – Orientação dos coletores solares</i>	77
4.2.2	<i>Limitação 02 – Inclinação dos coletores solares</i>	95
4.2.3	<i>Limitação 03 – Localização do tanque de armazenamento</i>	97
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>99</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE</b>	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o crescente consumo de energia nas edificações tem estimulado o aperfeiçoamento de tecnologias que permitem o aproveitamento de fontes de energia renováveis. No setor residencial, o consumo de energia para aquecimento de água chega a variar entre 15 e 30% (IEA, 2013), e é neste contexto que surgem os sistemas de aquecimento solar de água (SAS), uma tecnologia com potencial para reduzir substancialmente o consumo doméstico de eletricidade (CASSARD, DENHOLM e ONG, 2011).

A utilização desta tecnologia, que já é abrangente em outros países, foi ampliada no Brasil a partir de incentivos concedidos a programas habitacionais. Os benefícios decorrentes do uso vão desde a redução do consumo de energia elétrica pelo usuário e da demanda nos horários de pico (SALAZAR, 2004; KALOGIROU, 2009a; NASPOLINI; MILITÃO; RÜTHER, 2010, GIGLIO, 2015), à redução das emissões de gases de efeito estufa (TABORIANSKI, 2002; TSILINGIRIDIS; MARTINOPOULOS; KYRIAKIS, 2004), além de melhorias no nível de conforto dos banhos (TABORIANSKI; PRADO, 2004; ALTOÉ; FILHO; CARLO, 2012). Entretanto, seu uso ainda está aquém do desejável: até o ano de 2014 somente 6% dos domicílios que aquecem água utilizavam sistemas de aquecimento solar (EPE, 2016).

A maioria dos trabalhos que abordam sistemas de aquecimento solar de água se concentra nos aspectos tecnológicos dos componentes, na avaliação do custo benefício do sistema, ou ainda em comparações com sistemas de aquecimento de água convencionais. Todavia, ainda é pouco estudado o modo como o comportamento e as exigências dos usuários refletem no desempenho do sistema, e como este é influenciado pelas características do ambiente construído.

Em um estudo de caso, Mendonça (2009) identificou que entraves de natureza arquitetônica e urbanística comprometem o potencial de utilização dos sistemas de aquecimento solar. A falta de planejamento de um ambiente construído pensado para receber este tipo de tecnologia resulta em adequações do SAS que oneram seu custo e muitas vezes geram efeitos desfavoráveis à habitação. Giglio e Lamberts, (2016) observaram que o entendimento do funcionamento da tecnologia e a percepção de seus benefícios influenciam na forma como os usuários utilizam os SAS e, conseqüentemente, nos resultados de economia de energia. Pode-se concluir a partir dos trabalhos de Vieira *et al.* (2016) e Vieira *et al.* (2018), que a maximização

do desempenho dos sistemas de aquecimento solar, concomitante ao atendimento de requisitos mínimos de utilização, só é possível a partir da análise holística das interfaces do SAS com o ambiente e o usuário. Shariah e Shalabi (1997) já demonstraram que o ajuste em alguns parâmetros construtivos pode proporcionar melhorias na fração solar entre 7% e 15%. Portanto, para aprimorar o desempenho energético e dos níveis de serviço do sistema não se pode dissociá-lo de suas interfaces.

A tecnologia dos sistemas de aquecimento solar já foi aprimorada para proporcionar o máximo aproveitamento da energia disponível, conforme evidenciado em Jaisankar *et al.*, (2011); Shukla *et al.*, (2013), e Jamar *et al.* (2016). Além disso, os estudos de Hasan (1995), Shariah e Shalabi (1997), Mendonça (2009), Sangoi (2015), Giglio e Lamberts, (2016), Vieira *et al.* (2016), Vieira *et al.* (2018) e Fuentes, Arce e Salom (2018) comprovam a relação estreita entre o desempenho do SAS e os padrões de utilização do usuário, como os horários de banho, intervalos de ocorrência e frequência de utilização, bem como as características do ambiente construído, como a inclinação e orientação da cobertura, e a disponibilidade de espaço entre o forro e a cobertura, as quais influenciam no posicionamento, orientação e dimensões dos componentes do sistema.

Portanto, é fundamental que mais estudos explorem o efeito das interfaces dos sistemas de aquecimento solar sobre seu desempenho em condições reais de uso. Avaliações de tecnologias em condições ideais de instalação e utilização podem distorcer a influência real dos aspectos analisados no desempenho final. Nestas pesquisas, o monitoramento de sistemas em uso nem sempre é viável por demandar muito tempo e recursos. Desse modo, o uso de ferramentas computacionais que possibilitam o detalhamento dos sistemas estudados tem se tornado uma alternativa para avaliações mais complexas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é avaliar o potencial de melhoria no desempenho de sistemas de aquecimento solar de água, a partir da análise de suas interfaces com o ambiente construído e o usuário, para três cidades brasileiras.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar o modelo computacional utilizado nas análises de desempenho;
- Identificar os parâmetros de natureza construtiva e operacional que sensibilizam o desempenho do sistema de aquecimento solar em condições limitadas de uso para as três localidades estudadas;
- Determinar as reduções na fração solar e no consumo anual de energia do sistema em função de limitações impostas por características construtivas.

## 1.3 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Optou-se por um recorte no estudo com o objetivo de analisar sistemas de aquecimento solar em condições reais de uso. Para tanto, foram impostas condições limitantes relativas aos aspectos construtivos, a fim de representar situações reais em que o ambiente construído não foi pensado para o uso de SAS. Foram selecionadas como condições limitantes a localização do reservatório térmico, a inclinação, e a orientação do coletor solar.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

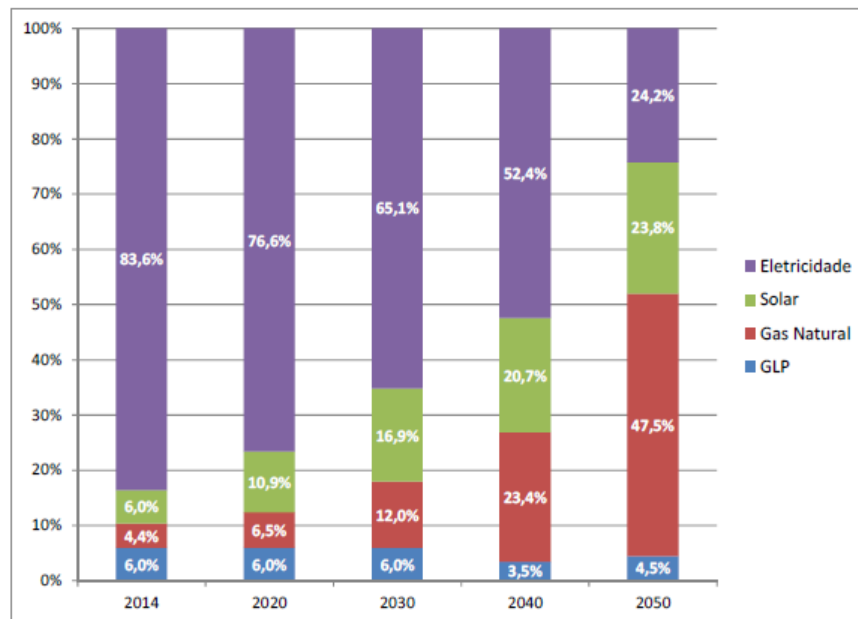
### 2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2017) o setor residencial ocupa a terceira posição mundial em consumo energético, tendo alcançado 22% do consumo mundial em 2015. É atribuída ao aquecimento de água uma parcela significativa do consumo total de energia neste setor, que varia de 15 a 30% em locais de clima frio e quente, respectivamente (IEA, 2013).

Em países de clima quente como o Brasil, a demanda por água aquecida em residências se destina predominantemente ao banho. Os sistemas de aquecimento de água para esta finalidade estão presentes em quase 80% dos domicílios brasileiros, de acordo com o estudo Demanda de Energia 2050 (EPE, 2016). A Figura 1 apresenta a participação das fontes de energia utilizadas no aquecimento de água para banho com projeções para as próximas décadas. Para o ano de 2014, a eletricidade prevaleceu como principal insumo energético nos domicílios que aquecem água, utilizada em 83,6% dos casos, seguida do aquecimento solar e gás liquefeito de petróleo, ambos com 6,0%, e do gás natural com 4,4%.

Observa-se uma tendência de crescimento do uso de energia solar e gás natural em detrimento do uso de eletricidade para aquecimento de água. A utilização mais expressiva da energia solar para esta finalidade nas próximas décadas se justificaria devido ao incentivo de programas habitacionais como o Minha Casa Minha Vida (EPE, 2016). O mesmo subsidiou a instalação de sistemas de aquecimento solar em mais de 220.000 habitações de interesse social entre os anos de 2012 e 2016 (BRASIL, 2017). Em 2015 o Brasil já despontava no quinto lugar do ranking mundial de área coletora instalada, com mais de 13 milhões de metros quadrados (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).

Figura 1 – Participação das fontes de energia no aquecimento de água para banho nos domicílios.



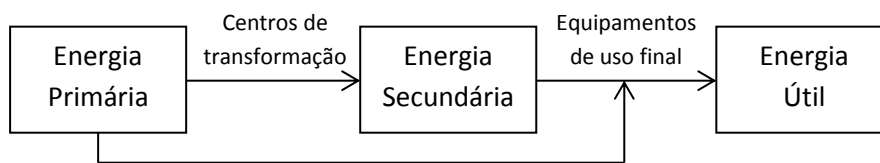
Fonte: Demanda de Energia 2050 (EPE, 2016).

A eletrotermia, uso da eletricidade para gerar energia térmica (RAIMO, 2007), é comum na maioria dos sistemas de aquecimento de água para banho. O chuveiro elétrico, por exemplo, aquecedor instantâneo patenteado no Brasil na década de 50 (NOGUEIRA, 2007), é utilizado em 69,5% do total de domicílios brasileiros (EPE, 2016), instalados individualmente ou atuando como *backup* de outro aquecedor em uma composição híbrida. Outros sistemas que fazem uso da eletricidade são pouco utilizados no Brasil, como os aquecedores de acumulação elétricos, capazes de armazenar e aquecer a água através do trabalho de uma resistência elétrica.

Os sistemas de aquecimento solar de água, assim como os sistemas a gás, têm uso pouco expressivo no Brasil, embora a energia solar seja uma fonte mais compatível para conversão em energia útil na forma de calor, e ambientalmente mais limpa quando comparada aos sistemas a gás (RAIMO, 2007). Esta compatibilidade se justifica devido às perdas de energia durante os processos de conversão regidos pelas Leis da Termodinâmica. De acordo com Strapasson (2004), a energia para uso humano pode ser classificada como primária, secundária e útil. A energia primária consiste nas fontes de energia bruta disponíveis na natureza, como as energias solar e hidráulica, e o petróleo. A energia secundária é qualquer forma de energia primária que passou por um processo de transformação, a exemplo da conversão de energia hidráulica em eletricidade. A energia útil consiste na forma final demandada pelo

usuário, assim como a energia térmica. Desse modo, cada etapa de transformação resulta em mais perdas sobre a quantidade de energia primária. Os processos de conversão de energia são ilustrados a seguir na Figura 2.

Figura 2 – Processos de conversão de energia.



Fonte: Strapasson (2004).

Levando em conta a diversidade e complexidade da matriz energética brasileira para geração de eletricidade e as perdas que ocorrem durante os processos de conversão, do ponto de vista da eficiência energética a eletrotermia torna-se paradoxal quando há possibilidade do uso da energia solar (primária) para gerar diretamente energia térmica (útil) (STRAPASSON, 2004).

Mundialmente, a aplicação da energia solar térmica predominou nos últimos cinquenta anos para finalidade de aquecimento de água em habitações unifamiliares (RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK, 2017). Na Jordânia, China, Israel e Chipre, 15%, 24%, 85% e 93% das habitações utilizam sistemas de aquecimento solar de água, respectivamente (RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK, 2017; Hu *et al.*, 2017; RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK, 2015; RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK, 2015). Os diversos estudos que abordam os sistemas de aquecimento solar têm dado enfoque não somente em sua eficiência e desempenho, mas na viabilidade econômica e na resposta ambiental, além de compara-los com outros sistemas de aquecimento de água.

Neste sentido, Taborianski e Prado (2004) e Tsilingiridis, Martinopoulos e Kyriakis (2004) confrontaram diferentes sistemas de aquecimento de água no Brasil e na Grécia, respectivamente, utilizando a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). No primeiro estudo o impacto ambiental do uso do chuveiro elétrico foi comparado aos sistemas de aquecimento solar e instantâneo a gás. A metodologia considerou as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e a energia total utilizada durante as etapas de mineração e processos de transformação da matéria prima, assim como a fase de uso dos equipamentos. No segundo estudo, os autores avaliaram o ganho ambiental

proporcionado pelo uso de sistemas de aquecimento solar com coletores de placa plana em substituição aos aquecedores a gás natural e elétrico. Em ambos os trabalhos se concluiu que os sistemas elétricos impactam mais significativamente no meio ambiente e no consumo de energia. O aquecedor a gás natural obteve a melhor resposta ambiental seguido do sistema de aquecimento solar, penalizado pelo uso de um *backup* elétrico.

Por meio dos indicadores Demanda de Energia Acumulada (DEA), Pegada de Carbono (PC) e Custo Equivalente Uniforme Anual (CEUA), Hang, Qu e Zhao (2012) compararam sistemas de aquecimento solar com coletor de placa plana e tubo evacuado aos sistemas convencionais de acumulação que utilizam gás natural e eletricidade. A análise desenvolvida para três diferentes cidades dos Estados Unidos considerou áreas distintas de coletor solar com o objetivo de equiparar os custos de instalação, uma vez que os coletores de tubo evacuado são mais caros. O resultado do estudo indicou que os aquecedores solares com *backup* a gás natural possuem melhor desempenho para os três climas. Os aquecedores convencionais a gás natural também obtiveram melhor resposta que os sistemas solares de placa plana com *backup* elétrico.

Diakoulaki *et al.* (2001) pontuaram que, embora muitas vezes a decisão de optar pelo sistema de aquecimento solar de água se limite aos preços de mercado, existe uma lacuna quanto ao conhecimento dos benefícios que o sistema pode proporcionar, do ponto de vista da economia de energia, emissões ao meio ambiente e geração de empregos. Ao realizarem uma Análise de Custo Benefício (ACB) sob a ótica destes três aspectos, os autores compararam sistemas de aquecimento solar com outros convencionais utilizados na Grécia. Os resultados mostraram vantagens no uso dos sistemas solares sobre aqueles que utilizam eletricidade e diesel, embora quando comparado ao sistema a gás natural, os benefícios não compensam o investimento inicial.

Boait *et al.* (2012) confrontaram, em termos de eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa, sistemas de aquecimento de água a gás, eletricidade e energia solar utilizados no Reino Unido. Para os autores, o estímulo ao uso de sistemas instantâneos, em detrimento dos sistemas de acumulação, promove o melhor aproveitamento da energia devido à redução de perdas de calor da água quente remanescente nas tubulações. Entretanto em comparação com sistemas elétricos, o uso de aquecedores solares, que armazenam a água quente, possibilita o

acúmulo de energia útil fora do horário de maior custo de eletricidade e nível de emissões de carbono.

Leidl e Lubitz (2009) apresentaram o potencial de contribuição de Sistemas de Aquecimento Solar de Água (SAS) em conjunto com os sistemas de Recuperação de Calor de Água Drenada a fim de alcançar as metas de redução de consumo de energia para aquecimento de água do setor residencial na cidade de Guelph, Canadá. O estudo demonstrou que para serem efetivas, as duas tecnologias precisam estar atreladas às políticas que subsidiam sua difusão em habitações novas e existentes.

Utilizando simulação computacional, Passos, Cardemil e Colle (2014) avaliaram os desdobramentos da inserção de sistemas de aquecimento solar de água em domicílios brasileiros onde predominam os chuveiros elétricos. Nos quatro cenários de tarifas de consumo e subsídio variáveis adotados, os aquecedores solares se mostraram vantajosos porquanto proporcionam redução da demanda de pico. O incentivo ao uso dessa tecnologia é consideravelmente menos oneroso que o investimento na ampliação das linhas de transmissão do setor elétrico para atender a elevada demanda de pico.

Sangoi (2015) também utilizou simulação computacional para analisar quatro sistemas de aquecimento de água em edificações unifamiliares e multifamiliares para cinco climas diferentes no Brasil. O estudo comparou os sistemas quanto aos consumos de água e energia destacando que o sistema de aquecimento solar pode não proporcionar economia de energia desejável a depender da sua configuração.

## 2.2 SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

Os Sistemas de Aquecimento Solar de Água de uso doméstico (SAS) normalmente são de pequeno porte, compostos por coletores solares que variam de 3 a 6 metros quadrados, tanques de armazenamento isolados termicamente com volume entre 150 e 300 litros (IEA, 2012), circuitos hidráulicos de transferência de energia, e sistema de aquecimento auxiliar (ABNT, 2008).

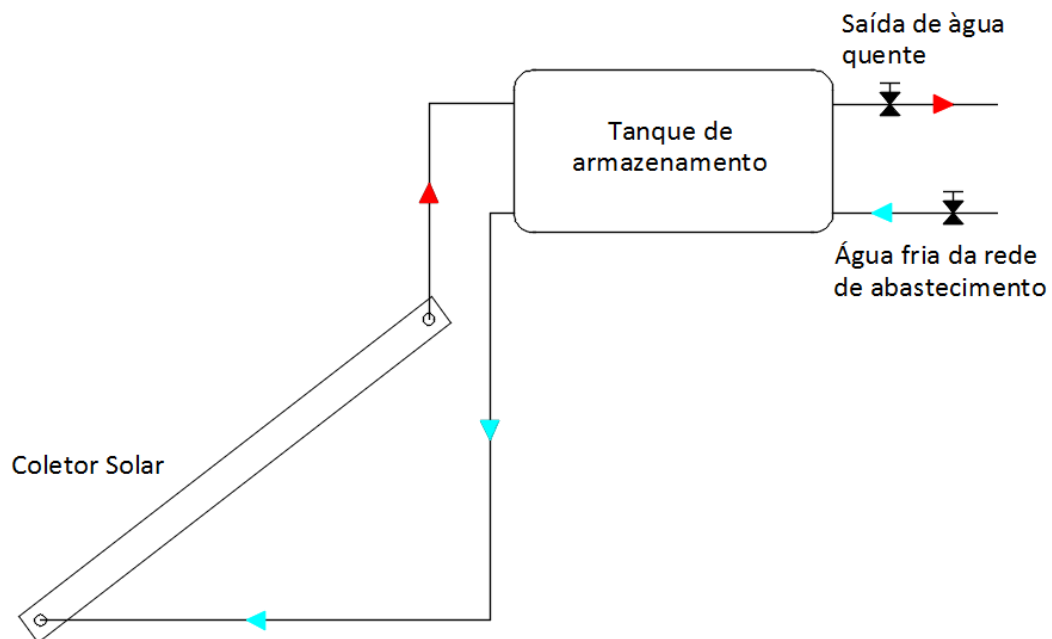
Os SAS podem ser de circuito direto ou circuito indireto<sup>1</sup>. No Brasil, são mais utilizados aqueles com circuito direto, conforme apresentado na Figura 3. Estes

---

<sup>1</sup> O aquecimento da água pode ser feito de forma direta ou indireta. Nos SAS de circuito indireto, um fluido refrigerante recebe o calor nos coletores e o transfere para água a partir de um trocador de calor.

SAS possuem coletores de placa plana e circulação natural (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017). Os coletores solares de placa plana são compostos por placas enegrecidas de alta absorção de energia, tubos de escoamento do fluido a ser aquecido, também chamado de fluido de trabalho, isolamento térmico nas faces inferior e laterais para reduzir as perdas de calor por condução, e cobertura transparente que permite a passagem da radiação solar (KALOGIROU, 2009b; IEA, 2012). São posicionados abaixo da cota de apoio do reservatório térmico de água quente atendendo a critérios de inclinação, orientação e distanciamento do mesmo, a fim de minimizar perdas de carga (ABNT, 2008).

Figura 3 – Desenho esquemático de um sistema de aquecimento solar de água por termossifão.



Fonte: Elaborado pela autora.

O circuito hidráulico primário, aquele entre os coletores e reservatório, conduz a água que é o fluido de trabalho do sistema. A circulação acontece por via natural ou efeito termossifão devido à diferença de densidade. Em virtude desse tipo de circulação, em que o tanque de armazenamento precisa estar localizado acima da cota dos coletores, é comum o uso de tanques de geometria horizontal a fim de minimizar as adequações arquitetônicas para ocultar o sistema na cobertura. No tanque de armazenamento térmico ocorre a estratificação da água com progressão ascendente da temperatura. Os estratos de maior temperatura estão localizados no

topo do reservatório, de onde a água será drenada para abastecer os pontos de consumo através do circuito secundário.

A NBR 15569, que estabelece os requisitos de projeto e instalação dos sistemas de aquecimento solar de água, também prevê que em locais onde há condições propícias ao congelamento devem ser instalados mecanismos de proteção tais quais: sistemas de recirculação forçada do fluido de trabalho, aquecimento resistivo e drenagem do fluido, entre outros (ABNT, 2008).

No que tange o programa habitacional Minha Casa Minha Vida, a Caixa Econômica Federal indica no Termo de Referência que regulamenta condições básicas para implantação dos SAS, a inclusão de uma caixa redutora de pressão. O dispositivo posicionado sobre o tanque de armazenamento de água quente tem a função de reduzir a pressão da rede de abastecimento de forma que o escoamento não comprometa a estratificação.

Um sistema de aquecimento solar por mais eficiente que seja não é capaz sozinho de atender a demanda de água quente de uma habitação a todo tempo. A constância no fornecimento de água quente é dependente de uma série de fatores que serão discutidos adiante, entre eles as condições climáticas locais, uma vez que é preciso radiação solar para gerar calor. Assim sendo, o sistema necessita de uma fonte auxiliar de energia para atender ou complementar a demanda nos períodos em que o SAS não possa fazê-lo. Nesse sentido, a eficiência do sistema pode ser avaliada em função da fração solar (FS), razão entre a energia solar térmica gerada pelo sistema (EU) e a demanda total de energia para aquecimento de água (DE) (ALTOÉ; FILHO; CARLO, 2012), conforme a Equação (1).

$$FS = \frac{EU}{DE} \quad (1)$$

Segundo Hobbi e Siddiqui (2009) a fração solar é o melhor indicador de desempenho do SAS comparada a outros parâmetros como a eficiência do coletor solar ou o fator de remoção de calor, uma vez que manifesta o desempenho de todo o sistema e não de um componente apenas. Este raciocínio conduz a necessidade de abordar os SAS de forma mais sistêmica.

Vieira, Beal e Stewart, (2014) afirmaram que a capacidade de fornecer água quente ou a eficiência energética de sistemas de aquecimento de água podem não ser ótimos a depender das condições e características do projeto e padrões de

operação. A ideia reforça o fato de que é preciso estar atento à sensibilidade do SAS quanto a sua interface com o usuário e o ambiente construído. Apesar da diversidade de estudos relacionados aos aspectos tecnológicos dos aquecedores solares de água, ainda são escassos aqueles que analisam de forma holística o desempenho do sistema inserido no ambiente construído e no contexto da dinâmica dos usuários. Vieira, Beal e Stewart (2014), Vieira *et al.* (2016) e Vieira *et al.* (2018), por exemplo, avaliaram o comportamento de sistemas de aquecimento solar de água individualmente e comparativamente com outros sistemas convencionais utilizados na Austrália. Os autores destacaram que para além da tecnologia, outros atributos relativos aos padrões de uso do sistema, níveis de serviço (atendimento a temperatura de consumo e controle de proliferação da bactéria *legionella*) e características locais interferem na avaliação final do mesmo. Shariah e Shalabi (1997) demonstraram que o ajuste em alguns desses parâmetros pode proporcionar melhorias na fração solar entre 7% e 15%. Portanto, para aprimorar o desempenho energético e dos níveis de serviço do sistema não se pode dissociá-lo de suas interfaces.

Estas interfaces são relativas aos parâmetros técnicos dos componentes (JAISANKAR *et al.*, 2011; SHUKLA *et al.*, 2013), ao comportamento e interação do usuário com o sistema (GIGLIO *et al.*, 2014; GIGLIO; LAMBERTS, 2016), à relação do SAS com o ambiente construído e às características climáticas do local de implantação do sistema (HOBBI; SIDDIQUI, 2009; HANG, QU; ZHAO, 2012; RODRÍGUEZ-HIDALGO *et al.*, 2012). Entretanto, nem sempre fica clara a delimitação entre quais parâmetros são de natureza técnica, relativos ao uso (operacionais), e ao ambiente construído, uma vez que alguns deles interagem entre si.

Dessa forma, estes parâmetros serão apresentados inicialmente em função do usuário e dos três principais componentes do SAS: o coletor solar, o reservatório térmico e as tubulações, discutidos a seguir.

### **2.2.1 Coletor solar**

O coletor solar é o componente principal de um SAS, responsável por captar e converter a radiação solar em calor e transferi-lo direta ou indiretamente para a água. A avaliação de coletores solares pode variar conforme a complexidade do modelo e o tipo de análise a ser desenvolvida. Em uma avaliação detalhada, podem ser elencados diversos parâmetros técnicos relativos às propriedades e características do componente, como absorvância, transmitância, espessura e

composição da placa absorvedora, espaçamento entre os tubos de escoamento, espessura e composição do isolamento térmico, e espessura e propriedades das superfícies transparentes (DUFFIE; BECKMAN, 2006; KALOGIROU, 2009b). Ou ainda vazão mássica, coeficientes de transferência de calor e perda global e fator de remoção de calor (HOBBI; SIDDIQUI, 2009).

Para simulação computacional de processos térmicos, análises simplificadas são adequadas a fim de sintetizar todos os parâmetros técnicos de um coletor. Três deles são de interesse: o ganho de energia ou eficiência ótica do coletor ( $F_R(\tau\alpha)_n$ ), a perda de calor ou coeficiente de perdas do coletor ( $F_R U_L$ ), e o modificador de ângulo de incidência ( $K_{\tau\alpha}$ ) (DUFFIE; BECKMAN, 2006; BRASIL, 2012).

Estes parâmetros são elencados pela NBR 15569:2008 como parâmetros de interesse para o dimensionamento da área coletora e volume de armazenamento, e pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética das Edificações Residenciais, RTQ-R (BRASIL, 2012) com objetivo de calcular a fração solar anual do sistema.

O modificador de ângulo de incidência consiste na razão entre a energia radiante direta incidindo a um ângulo ( $\theta$ ) formado com o eixo normal à superfície do coletor, e a energia radiante direta incidindo perpendicularmente à superfície do coletor, conforme a Equação (2).

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau\alpha_{\theta})}{(\tau\alpha)_n} \quad (2)$$

A equação que define o ângulo de incidência ( $\theta$ ) é uma função da orientação do coletor em relação ao equador, ou ângulo azimute de superfície ( $\gamma$ ), e da inclinação do coletor ( $\beta$ ). Estes parâmetros são necessários para a análise dos SAS e estão estreitamente relacionados ao posicionamento do coletor no ambiente construído. No Brasil, devido à localização da maior parcela territorial ao sul da linha do equador, os coletores solares devem estar voltados para o norte geográfico com desvio máximo de até  $\pm 30^\circ$  (BRASIL, 2012) e inclinados a um ângulo igual ao módulo da latitude local ( $\varphi$ ) mais  $10^\circ$  (ABNT, 2008; BRASIL, 2012)<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> A inclinação ótima dos coletores ( $\beta_{otm}$ ) varia de acordo com as mudanças na trajetória aparente do Sol, conforme a localização geográfica, período do ano e condições climáticas. Além disso, o  $\beta_{otm}$  está relacionado ao tipo de aplicação do sistema de aquecimento solar.

Segundo Mendonça (2009) embora tais parâmetros dos coletores estejam relacionados aos aspectos que envolvem o acesso à radiação e suas variações espaciais e temporais, na prática os parâmetros de orientação e inclinação dos coletores estão estreitamente relacionados às características de instalação do componente no ambiente construído, tais como inclinação da cobertura (condicionada ao tipo de telha), orientação das águas, disponibilidade de área para instalação dos coletores, sombreamento provocado por vegetação e construções do entorno, e índice de cobertura de poeira.

Então, para avaliar a interferência das limitações do ambiente construído sobre o desempenho do SAS, é preciso inicialmente compreender melhor os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$ .

Hasan (1995) investigou interferência destes parâmetros na otimização de sistemas de aquecimento solar por meio de simulação computacional. O estudo utilizou dados climáticos e perfis de consumo diário de água quente típicos da Cisjordânia. Variando a inclinação dos coletores entre 25° e 55° foi observado que não há um ângulo ótimo para coletar a maior quantidade de energia solar útil nos meses de verão e inverno. Maiores ângulos são ideais para o período de inverno enquanto que ângulos menores favorecem maior coleta nos meses de verão. Logo, se caso o ângulo de inclinação seja escolhido com o objetivo de coletar uma maior quantidade de energia ao longo do ano, menor deve ser a inclinação. No entanto menores inclinações exigem mais energia auxiliar para complementar a demanda nos meses mais frios onde se exige mais dos aquecedores. Além disso, segundo o estudo, a maior parte da energia coletada no verão não seria utilizada por ser superior à demanda.

Gunerhan and Hepbasli (2007), Skeiker (2009), Benghanem (2011), Moghadam, Tabrizi e Sharak (2011) e Soulayman e Hammoud (2016) aplicaram algoritmos para tratamento e determinação dos melhores ângulos de inclinação de coletores solares. Os cinco estudos utilizaram a quantidade de radiação solar incidente como indicador para determinação dos ângulos ótimos.

Conforme a distribuição da radiação solar ao longo do ano para regiões de média latitude, compreendida entre 23,45° e 43,45° nos hemisférios norte e sul, Soulayman e Hammoud (2016) concluíram que variações diárias, mensais e sazonais no ângulo de inclinação do coletor apresentam pouca interferência no ganho de energia anual médio, quando comparado a um coletor fixo. Skeiker (2009) ao analisar

diferentes zonas da Síria ( $\varphi=33,5^\circ$ ) constatou que um coletor fixo recebe 10% a menos de radiação solar ao longo de um ano comparado a um coletor com ângulos de inclinação variando duas vezes ao ano, e 12% a menos que aqueles com ângulo de inclinação variando mensalmente. Da mesma forma, para a cidade de Izmir na Turquia, Gunerhan and Hepbasli (2007) recomendam o uso de ângulos de inclinação com alterações mensais para atingir melhores resultados. Moghadam, Tabrizi e Sharak (2011) e Benghanem (2011) apontaram que a adoção de ângulos sazonais aumenta em 8% o ganho de energia quando comparado a um ângulo fixo. O estudo de Moghadam, Tabrizi e Sharak (2011), desenvolvido na cidade de Zahenda ( $\varphi=29,5^\circ$ ), Iraque, contou ainda com a validação dos resultados a partir da verificação experimental.

Shariah, Al-Akhras e Al-Omari (2002) analisaram por simulação computacional a inclinação ideal de coletores solares de SAS com circulação natural para maximizar a fração solar do sistema em duas cidades da Jordânia: Amman ( $\varphi=31,5^\circ$ ) e Aqaba ( $\varphi=29,5^\circ$ ). Segundo os autores, a inclinação aumenta com o incremento da área coletora, para obtenção de valores máximos de fração solar. Nas duas cidades, os sistemas que operam com fração solar elevada possuem inclinação ótima num intervalo entre  $\varphi$  e  $\varphi+20^\circ$ . Também foi ressaltado que o ângulo de inclinação ótimo para que o sistema atinja a máxima fração solar anual é maior que o ângulo que favorece a incidência máxima de radiação solar na superfície coletora. Isso ratifica o estudo de Hasan (1995), visto que inclinações maiores favorecem o ganho de energia nos meses de inverno, em que a demanda para aquecimento é maior. Os autores seguiram uma linha distinta dos estudos anteriores, enfocando na fração solar em detrimento da quantidade de energia incidente. Assim permite-se uma avaliação mais precisa da resposta do sistema e não apenas de um componente.

Telebizadeh, Mehrabian e Abdolzadeh (2011) utilizaram uma técnica de otimização baseada em princípios de seleção natural, Algoritmo Genético (AG), para determinar o ângulo azimute  $\gamma$  e inclinação  $\beta_{otm}$  ótimos que proporcionem maiores ganhos de energia em coletores solares e painéis fotovoltaicos. Observaram que não há grandes variações no ganho de energia para orientações diárias  $\gamma_d$ , mensais  $\gamma_m$ , sazonais  $\gamma_s$  e anuais  $\gamma_a$  diferentes de  $0^\circ$ , podendo-se assumir  $\gamma=0^\circ$  como sugerido por Duffie e Beckman (1982). No entanto, orientações horárias  $\gamma_h$  diferentes de  $0^\circ$  proporcionam um ganho de energia significativo, apesar de não ser comum em

sistemas de energia solar de uso residencial a utilização de dispositivos de rastreamento da trajetória solar devido ao elevado custo de implantação.

Para fins de aquecimento de água, usualmente são adotados ângulos de orientação  $\gamma$  e inclinação  $\beta$  anuais ótimos admitindo-se o coletor solar fixo. De modo geral, os estudos apontaram que o ângulo de inclinação ótimo se aproxima da latitude local, conforme resumido na Tabela 1, e está em função do período de maior demanda para aquecimento: o inverno.

Tabela 1 – Ângulo de inclinação e azimute ótimos para aquecedores solares de água.

AUTOR	LOCALIZAÇÃO	LATITUDE	ÂNGULO DE INCLINAÇÃO ÓTIMO	ÂNGULO AZIMUTE ÓTIMO
Benghanem	Madinah, Arábia Saudita	24,5°N	$\beta_{otm} = 23,5$	0°S
Moghadam <i>et al.</i>	Zahedan, Iran	29,5°N	$\beta_{otm} = 0,917\varphi + 0,321^\circ$	-
Shariah <i>et al.</i>	Akaba e Amman, Jordânia	29,5°N e 31,5°N	$\varphi \leq \beta_{otm} \leq \varphi + 20^\circ$	0°S
Hasan	Cisjordânia	32°N	$\beta_{otm} = 45^\circ$	0°S
Skeiker	Damascus, Síria	33,5°N	$\beta_{otm} = 31^\circ$	0°S
Gunerhan and Hepbasli	Izmir, Turquia	38,5°N	$\beta_{otm} = \varphi \pm 15^\circ$	0°S
Soulayman e Hammoud	-	$23,45^\circ \leq \varphi \leq 43,45^\circ$	$\beta_{otm} = 0,916\varphi + 1,171^\circ$	0°S
Duffie e Beckman	-	-	-	0°

Fonte: Elaborado pela autora.

É preciso conhecer se esta proposição é verdadeira para condições climáticas e latitudes distintas, como no Brasil, onde o inverno é pouco rigoroso, a localização geográfica é favorecida pela elevada incidência de radiação solar, além da variedade de climas que podem influenciar no desempenho do SAS.

Outros estudos enfocaram na importância dos coletores solares integrados à edificação, a partir da análise de sistema reais em uso. Santos e Rütther (2009) avaliaram as características de orientação, inclinação e área de cobertura de

residências em um trecho urbano na cidade de Florianópolis. Os autores perceberam que o potencial de aproveitamento da energia por painéis solares pode ser aprimorado pelo tipo de telha utilizada, que determina a inclinação média das coberturas, e pela orientação dos lotes, que influencia na disposição dos caimentos da cobertura. Mendonça (2009) reforçou a importância do projeto arquitetônico e urbanístico para aprimorar o aproveitamento da energia solar, além da necessidade de integração dos coletores de sistemas de aquecimento solar em estratégias de arquitetura bioclimática.

O trabalho de VIEIRA *et al.* (2018) pontuou que o potencial de economia de energia proporcionado por SAS pode ser reduzido de 80 a 83%, para coletores solares com orientações diferentes do Norte. A inclinação também exerce grande influência, podendo reduzir a fração solar entre 53 e 63%, para coletores instalados em fachadas. Já o índice de cobertura de poeira, quando reduz a transmitância do vidro do coletor em 5%, leva ao crescimento do consumo de energia elétrica do sistema em até 24%. A redução da transmitância do vidro em 64% pode aumentar o consumo anual de eletricidade entre cinco e seis vezes.

### **2.2.2 Tanque de armazenamento**

A energia solar disponível para captação pode exceder a carga máxima necessária para o aquecimento de água durante algumas horas do dia, entretanto, em outros instantes ela pode ser insuficiente para suprir a demanda. Além disso, os períodos de captação de energia térmica pelos coletores e consumo de água quente pelos usuários nem sempre são simultâneos, exigindo seu armazenamento (ABNT, 2008). Assim, os tanques de armazenamento têm a função de reservar a energia excedente para utilizá-la quando necessário (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Em sistemas domésticos, usualmente os tanques de armazenamento consistem em vasos metálicos pressurizados com isolamento térmico para reduzir as perdas de calor para o meio (KALOGIROU, 2009b).

O aproveitamento da energia armazenada no tanque é influenciado não só por sua resistência às perdas de calor, como também tem forte relação com o grau de estratificação ou mistura da água em seu interior. A estratificação pode ser afetada pelo tipo de circulação entre o coletor e o tanque de armazenamento além do volume, e forma do tanque. Da mesma forma que os coletores, estes parâmetros podem ser

limitados pelas características da cobertura<sup>3</sup> e, portanto, precisam ser explicados para expressar a relação entre o desempenho do sistema de aquecimento solar e sua interface com o ambiente construído.

Quanto a circulação de água, os SAS podem ser ativos ou passivos. Nos sistemas ativos o tanque de armazenamento está localizado abaixo do nível do coletor. Normalmente essa disposição é utilizada devido a limitações físicas da cobertura em comportar o tanque ou ainda devido às condições climáticas. Nos sistemas ativos o fluido de trabalho circula entre o coletor e o tanque de forma forçada com o auxílio de uma bomba. Nestes casos, a água que chega do coletor entra no tanque de armazenamento com maior velocidade, podendo comprometer a estratificação a depender da sua geometria. Segundo Kalogirou (2009b) a taxa de escoamento elevada em sistemas de circulação forçada proporciona uma melhoria no fator de remoção de calor,  $F_R$ , parâmetro relativo a capacidade de ganho de energia do coletor, o que potencializa a sua eficiência. Entretanto, se o desempenho do sistema por completo for levado em consideração, a fração solar pode ser aumentada com menores taxas de escoamento (sistemas passivos). Isso reforça a necessidade de analisar o sistema de forma integrada.

Nos sistemas passivos ou de circulação por termossifão, a água circula naturalmente devido à diferença de densidade. À medida em que a energia solar é absorvida, a água aquecida se expande e ascende até o tanque pela entrada superior, ao passo que o fluido de menor densidade no fundo do reservatório escoar para o coletor reiniciando o loop de aquecimento. Este processo favorece a disposição de camadas de água com temperaturas mais elevadas nos estratos superiores, de onde será drenada para consumo. Sistemas passivos são viáveis somente se o tanque de armazenamento puder ser instalado acima da cota de apoio do coletor.

Lavan e Thompson (1977) e Hollands e Lightstone (1989) comprovaram que a estratificação no interior do tanque de armazenamento eleva sensivelmente a energia nos estratos de saída do tanque e melhora a eficiência do coletor e do sistema. O grau de estratificação necessário para alcançar o melhor desempenho do sistema se dá por meio de menores taxas de escoamento (circulação por termossifão) (HOLLANDS; LIGHTSTONE, 1989).

---

<sup>3</sup> A disposição de espaço no ático em conformidade com o tamanho do equipamento, além das exigências estéticas da arquitetura, são determinantes na localização do tanque de armazenamento, exposto ou não às intempéries.

Vieira *et al.* (2018) analisou a sensibilidade do desempenho de dois tipos de sistemas de aquecimento solar às variações em 18 parâmetros de natureza técnica, construtiva e comportamental. O estudo avaliou por meio de simulações computacionais sistemas em uso utilizados na Austrália. Foi apontado que, em termos de desempenho geral, o sistema de aquecimento solar com circulação forçada e tanque de armazenamento vertical apresenta um desempenho melhor que o sistema com circulação natural e tanque horizontal. Neste estudo, é provável que o formato do tanque tenha influenciado significativamente na estratificação da água e conseqüentemente do desempenho do sistema. A verticalização dos reservatórios intensifica o processo de estratificação enquanto que reservatórios horizontais podem apresentar redução da estratificação devido a condução de calor na superfície interna e entre os estratos, facilitada pela altura reduzida (KALOGIROU, 2009b). Contudo, tanques horizontais com diâmetros superiores a 500mm apresentam desempenho similar aos verticais (MORRISON, 2001 apud KALOGIROU, 2009b).

Hasan (1997) comprovou por meio de simulação computacional que reservatórios horizontais e verticais pouco divergem quanto à eficiência para um mesmo padrão de consumo de água quente. O estudo foi conduzido para as condições climáticas e perfil de consumo de água quente na Palestina, considerando um sistema de aquecimento solar de uso doméstico com coletores de placa plana. Ao comparar a eficiência das duas geometrias de tanque, observou-se que somente em algumas horas do dia o modelo vertical se comportou ligeiramente melhor, fato atribuído ao maior grau de estratificação.

O volume do tanque de armazenamento também interfere no desempenho do sistema de aquecimento solar. Como o volume influencia na altura do tanque e sua área superficial, grandes volumes geralmente estão sujeitos a maiores perdas de calor para o meio, especialmente se os tanques estiverem expostos à grandes variações de temperatura ao longo do dia, quando localizados externamente à cobertura. O termo de referência do programa habitacional MCMV recomenda que o tanque de armazenamento esteja posicionado internamente à cobertura, embora esta condição nem sempre seja possível devido à incompatibilidade das dimensões do equipamento com as características da cobertura.

Ressalta-se que dos estudos elencados que abordam a influência do volume de armazenamento no desempenho do sistema, não foi encontrado nenhum

que analisasse o efeito do posicionamento do tanque de armazenamento quando abrigado entre o forro e a cobertura (ático), e quando exposto às condições climáticas externas.

No trabalho de Hasan (1995) foi avaliado através de simulação computacional um SAS com circulação natural, composto por coletores de placa plana e tanque de armazenamento vertical estratificado. O estudo analisou a influência do volume armazenado no ganho de calor útil do componente. Os tanques de maior volume teoricamente tendem a armazenar mais energia, entretanto perdem mais calor devido a maior área superficial, além de produzir menores temperaturas de água quente. A variação nos volumes entre 100 a 300L mostrou que na maioria dos meses, o tanque de 300L apresentou menor ganho de energia útil, ou seja, energia total decrescida das perdas de calor para o meio. Os tanques entre 150 e 200L proporcionaram maiores ganhos de calor, entretanto o estudo não deixa claro se o equipamento está ou não exposto a intempéries.

Deve-se chamar atenção mais uma vez para a variável de resposta do estudo, ganho de energia útil. O ganho de energia útil, assim como a eficiência dos componentes de um SAS, expressa de forma restrita sua eficiência uma vez que estão limitados ao comportamento de um único componente. No estudo posterior (HASAN, 1997) o autor comprovou que a fração solar é a variável de resposta global do sistema mais adequada para avaliá-lo.

Shariah e Löf (1996) também analisaram através de simulações computacionais um sistema com características similares ao do estudo anterior, comparando o efeito do volume do reservatório na fração solar do sistema, considerando-se tanques verticais com diferentes alturas (0,4; 1,0 e 1,6m) e configurações de temperatura da água armazenada (50°, 60°, 70° e 80°C). O sistema foi considerado em uso a partir da adoção de um perfil de consumo de água quente com demanda predominando das 8 às 11h e das 18 às 22h. Foi observado que a altura do tanque de armazenamento interfere na fração solar do sistema quanto maior for seu volume. No intervalo entre 60 e 150L o crescimento da fração solar é expressivo para as três configurações de altura do tanque. Para volumes entre 150 e 400L, tanques com altura de 0,40m apresentaram uma relação inversamente proporcional entre o volume e a fração solar, justificado pelo grau de estratificação reduzido para esta altura e aumento da perda de calor. Em contrapartida, para as

demais alturas, o crescimento da fração solar é pouco significativo à medida que o volume é aumentado de 150 para 400L.

Existe ainda uma relação de interesse entre o volume armazenado e a área coletora  $V_{ar}/A_c$  que pode interferir na fração solar do SAS. Shariah e Löf (1996) perceberam que quando a área coletora está fixada em  $2\text{m}^2$ , para quaisquer configurações de temperatura de armazenamento, a fração solar aumenta com o crescimento da relação  $V_{ar}/A_c$  até  $60\text{L}/\text{m}^2$ . Para relações  $V_{ar}/A_c$  entre 60 e  $120\text{L}/\text{m}^2$ , o crescimento da fração solar é menos sensível. O artigo destacou que áreas coletoras superiores a  $2\text{m}^2$  tendem a apresentar maior fração solar para menores relações  $V_{ar}/A_c$ .

Hobbi e Siddiqui (2009) modelaram no programa TRNSYS um sistema de aquecimento solar com perfil de consumo de água quente configurado para uma habitação unifamiliar localizada em Montreal, Canadá. Utilizando a fração solar como indicador do desempenho global do sistema, os autores observaram que a relação  $V_{ar}/A_c$  entre 55 e  $65\text{L}/\text{m}^2$  resulta em maiores valores de fração solar mensais e anual. Segundo o estudo, tanques com volume superior à relação  $80\text{L}/\text{m}^2$  apresentam maior perda de calor para o meio, comprometendo o desempenho geral.

O RTQ-R, regulamento que estabelece os requisitos técnicos para classificação do nível de eficiência energética de edificações residenciais, determina que para relações entre 40 e  $50\text{L}/\text{m}^2$  ou superior a  $150\text{L}/\text{m}^2$ , os sistemas de aquecimento solar de água serão classificados com no máximo nível D de eficiência, em uma escala que varia de A a E, onde A é o nível de maior eficiência e E o nível de menor eficiência (BRASIL, 2012). Afirma ainda que SAS com relação inferior a  $40\text{L}/\text{m}^2$  serão classificados com nível E. Já os SAS do programa MCMV são padronizados, com volume do tanque de armazenamento fixado em 200L, conforme o Termo de Referência, e coletores solares com área aproximada de  $2\text{m}^2$ . Assim, estes sistemas solares destinados a habitações de interesse social apresentam relação  $V_{ar}/A_c$  próxima a  $100\text{L}/\text{m}^2$ .

Kalogirou (2009a) cita como usual o intervalo entre 40 e  $80\text{L}/\text{m}^2$ . Duffie e Beckman (1991), conforme citado por Shariah e Löf (1996) e Hobbi e Siddiqui (2009), recomendam uma relação entre 50 e  $75\text{L}/\text{m}^2$ .

O último parâmetro elencado neste trabalho relativo à geometria do sistema refere-se à distância entre o coletor e o tanque de armazenamento. A NBR 15569 destaca a necessidade de respeitar uma dada altura mínima  $h$  entre a parte

superior do coletor e o fundo do tanque de armazenamento, a fim de evitar o fluxo reverso da água, que pode ocorrer a noite quando a temperatura do coletor estiver mais baixa que a água no interior do reservatório.

No termo de referência de instalação de SAS da Caixa Econômica Federal é estabelecido o atendimento à seguinte relação, conforme a Equação (3):

$$D_H/D_V \leq 10$$

(3)

Onde:

$D_H$ : a distância horizontal entre o tanque e o coletor;

$D_V$ : a distância vertical entre o tanque e o coletor,  $D_V > 20\text{cm}$ .

No estudo de Hasan (1995) é indicado que o desempenho do sistema pode ser aprimorado para  $D_V$  inferior a 1,0m enquanto que distâncias superiores levam a perda de pressão nos circuitos primários, reduzindo seu desempenho.

#### 2.2.2.1 Backup

O RTQ-R determina a classificação da eficiência de sistemas de aquecimento de água em função de um atributo denominado equivalente numérico. Para sistemas mistos como o sistema de aquecimento solar, o nível de eficiência depende do tipo de *backup* utilizado. Quando combinado com um aquecedor a gás ou bomba de calor, o nível de eficiência de um SAS corresponde ao maior equivalente numérico dentre os dois, isto é, o maior nível de eficiência energética. Para *backup* elétrico, o nível de eficiência corresponde ao equivalente numérico do sistema de aquecimento solar, desde que sua fração solar seja igual ou superior a 70%. Para valores inferiores de fração solar, e nos demais casos de sistemas mistos, o nível de eficiência do sistema de aquecimento de água consistirá no percentual de contribuição de cada sistema para o atendimento à demanda multiplicado por seu equivalente numérico.

O chuveiro elétrico é utilizado com frequência como backup dos SAS, inclusive é encorajado seu uso em habitações do programa MCMV, que permite o uso de aquecedores de passagem a gás ou chuveiro elétrico como *backup* e veda o uso de resistência elétrica no interior do tanque de armazenamento. Esta restrição levanta questionamentos quanto ao comprometimento da eficiência do sistema. Para Boait *et al.* (2012), o estímulo ao uso de sistemas instantâneos, em detrimento dos sistemas

de acumulação, promove o melhor aproveitamento da energia devido à redução de perdas de calor da água quente remanescente nas tubulações.

Sangoi (2015) observou que o uso da resistência elétrica no interior do tanque de armazenamento de sistemas de aquecimento solar leva a um alto consumo de energia. Isso é justificado pela manutenção da temperatura da água no reservatório dentro de uma faixa pré-estabelecida, resultando em gasto de energia fora do horário de demanda. No estudo, para residências unifamiliares o SAS combinado com chuveiro elétrico apresentou menor consumo energético enquanto que o sistema de aquecimento solar com uso de resistência elétrica no tanque de armazenamento foi o que mais consumiu energia. Entretanto, para esta comparação, a resistência elétrica foi configurada para manter a temperatura da água em 60°C, e as vazões de consumo para banho são distintas. A autora recomenda que o controle automatizado do acionamento da resistência elétrica a partir de um cronograma de horários próximos ao definido para banho pode ser uma alternativa para reduzir o consumo e melhorar a eficiência.

No estudo de Altoé, Filho e Carlo (2012), foi constatada uma redução média de 70% no consumo de eletricidade destinada ao aquecimento de água, em substituição ao chuveiro elétrico de uma residência unifamiliar na cidade de Viçosa, Minas Gerais, considerando o uso de um SAS combinado a uma resistência elétrica inserida no tanque com 2500 W e acionamento automatizado.

#### 2.2.2.2 Temperatura da água

A energia necessária para atender a demanda de aquecimento de água quente solicitada a um SAS depende, entre outros fatores, da temperatura de entrada de água da rede de abastecimento, da temperatura de armazenamento do tanque, e da temperatura de consumo nos pontos de uso (HOBBI; SIDDIQUI, 2009).

A temperatura de água fria da rede de abastecimento varia conforme as condições climáticas locais, podendo ser determinada em função da temperatura ambiente. No procedimento de determinação da eficiência de sistemas de aquecimento solar de água, o RTQ-R sugere a adoção da temperatura de água fria igual a temperatura média mensal ambiente decrescida de 2°C. Entretanto, esta tática é questionável. Durante a investigação do comportamento de sistemas de aquecimento solar sob a ótica da influência do usuário no desempenho do sistema, Giglio (2015) monitorou o SAS de uma habitação unifamiliar na cidade de Londrina,

Paraná. Os dados medidos de temperatura média mensal de água fria da rede de abastecimento foram comparados com os dados de temperatura de água fria na estação de tratamento, fornecidos pela concessionária local. Foi constatado que a temperatura de água fria, para os dois casos é maior que a temperatura ambiente. A autora recomenda o uso de dados medidos em análises de demanda de energia.

Hendron *et al.* (2004) desenvolveram uma equação que correlaciona a temperatura anual média do ar e a máxima diferença entre as temperaturas ambientes médias mensais para determinar a temperatura da rede de abastecimento. Este método é utilizado pelo programa EnergyPlus para determinar a temperatura de água da rede a partir dos dados do arquivo climático carregado na modelagem.

Quanto à temperatura de consumo, o RTQ-R estabelece como valor mínimo 40°C, podendo-se adotar 38°C nas regiões Norte e Nordeste. O regulamento determina também que a temperatura de armazenamento seja igual ou superior a 40°C. Alguns estudos destacaram que é necessário manter a temperatura da água em aproximadamente 60°C para combater a proliferação da bactéria *Legionella* (VIEIRA; BEAL; STEWART, 2014; SANGOI, 2015; VIEIRA *et al.*, 2016), que pode se proliferar em reservatórios de água com temperatura armazenada entre 20 e 45°C (DIEDEREN, 2008; HSE, 2013 ). A bactéria *Legionella* está associada a Doença dos Legionários, um tipo de infecção no sistema respiratório que pode levar a morte (FERREIRA; CUNHA, 2007). No Brasil ainda não há informações concretas quanto a contribuição dos sistemas de aquecimento de água nos casos de infecção por *Legionella*, e ainda não existe uma legislação que regule os sistemas de aquecimento de água para prevenir a proliferação desta bactéria. Em Portugal, o Instituto Português de Qualidade estabelece que os sistemas de armazenamento de água quente devem manter a temperatura da água próxima a 60°C, de modo que nos pontos mais afastados do circuito de distribuição a temperatura permaneça acima de 50°C.

Boait. *et al.* (2012) destacaram a ambiguidade na legislação britânica que orienta sobre as medidas de mitigação de *Legionella* em sistemas de água quente domésticos. Dentre os sistemas avaliados no estudo, nenhum obedeceu a norma britânica BS6700. Os autores sugerem que há uma tendência da maioria dos sistemas armazenarem água quente somente em parte do tempo a 60°C, desperdiçando energia sem redução significativa do risco de *Legionella*, enquanto componentes que oferecem maior risco, como os tanques alimentadores, não são abordados.

### 2.2.3 Circuitos hidráulicos

Os circuitos hidráulicos de um sistema de aquecimento solar de água, responsáveis por transportar a energia térmica entre os componentes do SAS, se dividem em circuito primário e circuito secundário. O circuito primário é aquele que liga os coletores solares ao tanque de armazenamento enquanto que o circuito secundário consiste no circuito hidráulico que conecta os pontos de uso ao tanque de armazenamento (ABNT, 2008). Aqui o entendimento do termo “circuitos hidráulicos” limita-se às instalações de água quente, embora o circuito hidráulico completo de um sistema de aquecimento de água compreenda circuitos de alimentação de água quente e fria.

A NBR 15569 estabelece alguns requisitos para os circuitos hidráulicos em SAS. Segundo a referida norma, tubos, conexões e acessórios devem suportar as temperaturas e pressões máximas a que serão submetidos sem comprometimento de sua integridade. Além disso, o isolamento térmico em instalações de sistemas de aquecimento solar é obrigatório para minimizar as perdas de calor assim como as características geométricas da instalação (distâncias entre coletores e tanque de armazenamento) devem ser atendidas de forma a reduzir as perdas de carga, especialmente nos sistemas de circulação por termossifão (ABNT, 2008).

As tubulações de água quente que compõem sistemas de aquecimento solar de uso doméstico podem ser constituídas de materiais metálicos ou poliméricos. Os mais utilizados para esse tipo de instalação estão elencados na Tabela 2:

Tabela 2 – Características de tubulações de instalações de água quente.

MATERIAL	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	TEMPERATURA DE SERVIÇO
Cobre	389 W/mK	Acima de 100°C
CPVC <sup>a</sup>	0,14 W/mK	80°C
PEX <sup>b</sup>	0,38 W/mK	70°C
PPR <sup>c</sup>	0,24 W/mK	70°C

<sup>a</sup> CPVC – Policloreto de Vinila Clorado.

<sup>b</sup> PEX – Polietileno Reticulado Monocamada.

<sup>c</sup> PPR – Polipropileno Copolímero Random.

Fonte: Almanza; Lentz; Jiménez, (1997); BASKIN *et al.* (2004); TIGRE (2011); AMANCO (2016).

As tubulações metálicas em geral são mais resistentes e apresentam maior condutividade térmica, sendo mais utilizadas em situações onde se prevê

maiores temperaturas de serviço. Em contrapartida, além de serem mais cara, demandam isolamento térmico mais eficiente devido à elevada condutividade térmica. Já os tubos poliméricos são mais utilizados devido ao custo e maior facilidade de instalação.

Os fabricantes de CPVC e PPR indicam que as perdas térmicas são desprezíveis, dispensando-se o uso de isolantes térmicos em trechos de até 20 metros de comprimento. Para maiores comprimentos seu uso é recomendável. As perdas podem atingir 2°C em comprimentos inferiores a 20 metros quando adotada vazão de 3L/min.

Em instalações com tubulações metálicas, o RTQ-R condiciona a atribuição dos níveis de eficiência A ou B à condição de isoladas termicamente com espessura mínima conforme indicado na Tabela 3:

Tabela 3 – Espessura mínima de isolamento de tubulações para aquecimento de água.

MATERIAL	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/MK)	ESPESSURA MÍNIMA DO ISOLAMENTO TÉRMICO (CM)	
			DN < 40mm	DN ≥ 40mm
Tubulações metálicas	$T \geq 38$	$0,032 \leq \lambda \leq 0,040$	1,0	2,5

Fonte: Adaptado de Brasil (2012).

Nas tubulações não metálicas a espessura mínima de isolamento térmico deve ser de 1,0cm para qualquer diâmetro nominal de tubulação com  $0,032 \leq \lambda \leq 0,040$  W/mK.

Para situações em que a condutividade está fora do intervalo apresentado na Tabela 3, a espessura (E) deve ser determinada conforme a Equação (4):

$$E = r \left\{ \left( 1 + \frac{e}{r} \right)^{\lambda/\lambda'} - 1 \right\}$$

(4)

Onde:

E: espessura mínima de isolamento (cm);

r: raio externo da tubulação (cm);

e: espessura de isolamento listada na Tabela 3 referente a temperatura da água e diâmetro nominal da tubulação em questão;

$\lambda$ : condutividade do material alternativo à temperatura média indicada para a temperatura da água (W/mK);

$\lambda'$ : valor superior ao intervalo de condutividade listado na Tabela 3 para a temperatura da água (W/mK).

Shariah e Shalabi (1997) e Hobbi e Siddiqui (2009) utilizaram simulação computacional para aperfeiçoar diversos parâmetros de sistemas de aquecimento solar de água com circulação natural e forçada, respectivamente. No primeiro estudo os autores mostraram que variações entre 3 e 12mm de diâmetro do circuito primário influenciam diretamente na fração solar do sistema, embora valores superiores a 12mm não impliquem em maiores ganhos de fração solar. Hobbi e Siddiqui (2009) verificaram a relação entre o diâmetro interno e o comprimento total do circuito primário (entre o coletor e o trocador de calor) do sistema. Eles observaram que para um mesmo diâmetro, a fração solar do sistema diminui quanto maior for o comprimento do tubo e esta relação se acentua à medida que os diâmetros aumentam de tamanho. De modo similar, para um mesmo comprimento, a fração solar reduz com maior intensidade quanto maior for o diâmetro. O estudo apontou que o melhor desempenho do sistema, em termos de fração solar, é alcançado quando o circuito primário possuir comprimento total inferior a 10m e diâmetro interno entre 19,9mm e 25,4mm.

Qu, Yin e Archer (2010) investigaram o desempenho de um sistema solar de aquecimento e arrefecimento de ambiente composto por coletores solares parabólicos, resfriadores de absorção e trocadores de calor, instalados no centro de pesquisas da Universidade de Carnegie Mellon, Estados Unidos. Segundo a pesquisa, o comprimento e o diâmetro do circuito de loop dos coletores, circuito primário, exercem papel importante na fração solar, afetando a perda de calor do sistema, a vazão e capacidade calorífica do fluido de trabalho. Análises de otimização do sistema a partir de simulações computacionais mostraram que a redução dos dois parâmetros pode melhorar a utilização da energia útil aumentando sua fração solar.

Sangoi (2015) observou que o efeito do isolamento térmico em tubulações de sistemas de acumulação é pouco significativo para pequenos comprimentos de circuito secundário, como é usual em habitações unifamiliares. No entanto, para circuitos de comprimento superior a 20 metros, as perdas térmicas são mais expressivas e a utilização de isolantes torna-se imprescindível. Além disso, também foi observado que quando o intervalo entre banhos é maior, ocorrem mais

perdas de calor nas tubulações do circuito secundário. Para estes casos o uso de isolantes térmicos pode refletir na redução do consumo de água e na demanda de energia

#### 2.2.4 Usuário

Como já foi observado em outros estudos, o comportamento do usuário exerce um papel proeminente na variação do consumo de energia, mas a extensão dessa influência é pouco conhecida (SANTIN; ITARD; VISSCHER, 2009). Embora a tecnologia dos sistemas de aquecimento solar esteja aprimorada para proporcionar o máximo aproveitamento da energia disponível, alguns dos estudos elencados nos tópicos anteriores já deram indícios da relação estreita entre o desempenho do SAS e os padrões de utilização do usuário, como os horários de banho, intervalos de ocorrência e frequência de utilização, bem como o nível de conforto do banho proporcionado por maiores vazões do chuveiro e facilidade de mistura.

Giglio *et al.* (2014) e Giglio e Lamberts (2016) avaliaram o potencial de economia de energia proporcionado por SAS utilizados em habitações de interesse social, a partir de medições de sistemas em uso. Os autores identificaram que há problemas na obtenção de bons resultados de economia de energia a partir do uso de SAS devido às dificuldades dos usuários em compreender e operar corretamente a tecnologia – problemas em misturar a água até encontrar a temperatura ideal de banho e o uso inadequado do *backup* quando há disponibilidade de água quente são os mais frequentes. Os usuários eficientes foram identificados como aqueles que conseguem utilizar o SAS com o menor uso possível de energia elétrica – *backup* – para complementar a demanda de aquecimento de água. Para estes usuários, a fração solar anual do sistema atingiu 87% enquanto que os SAS operados por usuários menos eficientes obteve fração solar anual de 72%.

Giglio *et al.* (2014) e Sangoi (2015) também apontaram que parâmetros ligados a hábitos de consumo, aqueles relativos ao período do dia em que se concentram os banhos, sua duração e frequência, também afetam o desempenho do sistema de aquecimento solar. Tomando-se para análise o horário de banho, Hasan (1995) comprovou que a água armazenada durante o horário de insolação acumula um elevado conteúdo energético e em contrapartida, sua drenagem do tanque para os pontos de consumo perturba o equilíbrio energético proporcionado pela estratificação reduzindo o ganho de temperatura. Dessa forma, a correspondência

entre o horário de banho e o ganho de energia útil no tanque de armazenamento (banhos durante o dia) leva a menores níveis de desempenho do sistema, enquanto que o consumo noturno proporciona melhores resultados de desempenho<sup>4</sup> (HASAN, 1995).

O perfil de consumo de água quente, assim como o horário e frequência de uso variam conforme as condições climáticas locais, hábitos culturais e a rotina de trabalho dos usuários. Estudos em países de clima frio mostraram que a demanda de água quente atinge picos no início da manhã, entre as 6:00 e 9:00h, e no início da noite, entre as 18:00 e 21:00h, normalmente antes de sair de casa para trabalhar ou estudar e ao retornar. Nos finais de semana há um deslocamento do horário de pico da manhã, devido a mudança na rotina, uma vez que normalmente os usuários não estudam ou trabalham nesses dias (FUENTES; ARCE; SALOM, 2018). No Brasil, o trabalho de Giglio (2015) apontou que os usuários têm preferência por banhos entre as 18:00 e 21:00h.

Sangoi (2015) e Fuentes, Arce e Salom (2018) destacaram ainda que podem haver perdas de energia decorrentes do resfriamento da água no circuito secundário. Estas perdas são justificadas por ineficiência do sistema de distribuição até os pontos de consumo e pelo intervalo entre os banhos dos usuários.

Além dos hábitos de utilização do sistema de aquecimento de água, as exigências do usuário também interferem em seu desempenho. Altoé, Filho e Carlo (2012) investigaram o consumo de energia elétrica pelo *backup* de um sistema de aquecimento solar de água a partir do estabelecimento de três condições de conforto de banho baseadas na vazão do chuveiro: reduzido (3L/min), regular (5L/min) e bom (7L/min). O aumento da condição de conforto de banho de reduzido para regular, e de regular para bom implicou no acréscimo de 53% e 69% na demanda de energia elétrica, respectivamente. Os autores ainda observaram que em SAS com nível de conforto bom, o consumo de energia elétrica pelo *backup* é menor que em sistemas tradicionais com uso exclusivo do chuveiro elétrico de vazão reduzida.

---

<sup>4</sup> Como destacado em Giglio *et al.* (2014) e Giglio e Lamberts (2016), uma vez que a eficiência do sistema é interpretada em termos de uso do *backup*, os melhores resultados de desempenho são traduzidos em maiores frações solares.

### 2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Devido ao número de incertezas e variações a que estão sujeitos os experimentos físicos, além das limitações em reproduzi-los, por conta de fatores como duração excessiva da execução e implicações socioeconômicas, a simulação computacional apresenta-se como uma alternativa promissora para análise de desempenho e aprimoramento de projetos e sistemas (SHRIVASTAVA; KUMAR; UNTAWALE, 2017). Antes do desenvolvimento de programas de computador, Hottel e Woertz (1942), Hottel e Whillier (1958), Tabor (1958) e Bliss (1959), já realizavam modelagens numéricas de sistemas de aquecimento solar. Com o crescimento dos estudos com enfoque na energia solar, foram elaborados softwares de simulação para auxiliar na avaliação do comportamento térmico e energético de edificações e seus sistemas integrados de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (*HVAC*). Os principais programas utilizados para essas análises são brevemente descritos na Tabela 4. Dentre eles somente o EnergyPlus e o RETScreen International são disponibilizados gratuitamente. A maioria destes softwares foi validada por outros programas, experimentos físicos ou testes certificados.

EnergyPlus, TRNSYS e RETScreen são os programas mais aplicados em estudos de sistemas de energia solar. Foi observado que nos trabalhos que envolvem simulação computacional do desempenho de sistemas de aquecimento solar para diferentes configurações e condições de uso, o EnergyPlus (ALTOÉ; FILHO; CARLO, 2012; SKERLIĆ *et al.*, 2013; VIEIRA; BEAL; STEWART, 2014; VIEIRA *et al.*, 2016; VIEIRA *et al.*, 2018) e o TRNSYS (HASAN, 1995; SHARIAH; LÖF, 1996; SHARIAH; SHALABI, 1997; MICHAELIDES; WILSON, 1997; LIMA, 2003; KALOGIROU, 2009a; RAFFENEL *et al.*, 2009; GLEMBIN *et al.*, 2012; LI *et al.*, 2015; STARKE *et al.*, 2015) são os mais utilizados. Para análise da viabilidade técnica e econômica dos sistemas de aquecimento solar, são empregados o RETScreen *International* (ARIF, 2012; RAJAB *et al.*, 2017) e o TRNSYS (KALOGIROU, 2009a).

Embora possua uma interface pouco amigável, o EnergyPlus é notável por permitir ao usuário inserir especificações do sistema modelado de forma detalhada. Dispõe de um esquema próprio de agrupamento dos dados de entrada, ou objetos, de forma que é possível inserir componentes conforme as características do projeto.

Tabela 4 – Programas para modelagem e simulação computacional.

PROGRAMA	FABRICAÇÃO	DESCRIÇÃO
<b>EnergyPlus</b>	Departamento de Energia dos Estados Unidos	Programa gratuito amplamente utilizado por pesquisadores, projetistas, consultores e agências governamentais para modelagem detalhada e simulação do comportamento térmico e energético de ambientes construídos e sistemas HVAC integrados. Possui interface com AutoCad e SketchUp, ferramentas que auxiliam no processo de modelagem.
<b>Polysun</b>	Vela Solaris, Estados Unidos	Programa comercial, destinado ao projeto, dimensionamento e aprimoramento de sistemas solares térmicos, fotovoltaicos, bombas de calor e sistemas combinados (PV/T).
<b>RETScreen International</b>	Departamento de Recursos Naturais do Canadá	Gratuito, projetado para realizar análises comparativas de projetos que exploram diferentes fontes de energia. É capaz de avaliar a produção de energia, redução das emissões de gases de efeito estufa e viabilidade econômica de projetos de energia limpa.
<b>SolarPro</b>	Estados Unidos	Capaz de simular a operação de sistemas de aquecimento solar de água utilizando arquivos climáticos. As análises são baseadas nas especificações técnicas dos componentes e nos padrões de uso de água quente.
<b>SolDesigner</b>	Alemanha	Permite desenvolver projetos de sistemas de aquecimento solar de água, levando em consideração as características geométricas da edificação, a demanda de energia para aquecimento e carga térmica. Também calcula a área coletora, volume de armazenamento e benefícios gerados pelo uso do sistema.
<b>TRNSYS</b>	Estados Unidos	Realiza análise transiente de diversos sistemas de energia solar. Trabalha com uma abordagem modulada sequencial que permite a resolução iterativa de equações diferenciais até alcance da convergência. Possui uma extensa biblioteca de componentes, cada um dos quais modela uma parte do sistema. O programa permite ao usuário a inserção de modelos matemáticos para modificar componentes existentes ou escrever os seus próprios. Faz interface com outros programas de simulação como o MATLAB.
<b>T*SOL</b>	Alemanha	Permite ao usuário realizar uma análise termoenergética detalhada dos sistemas de aquecimento solar de água e aquecimento de ambientes, além de possibilitar avaliações da viabilidade econômica do projeto. Disponibiliza um banco de dados extenso contendo especificações técnicas de coletores solares, reservatórios térmicos, tubulações, bombas hidráulicas e trocadores de calor.

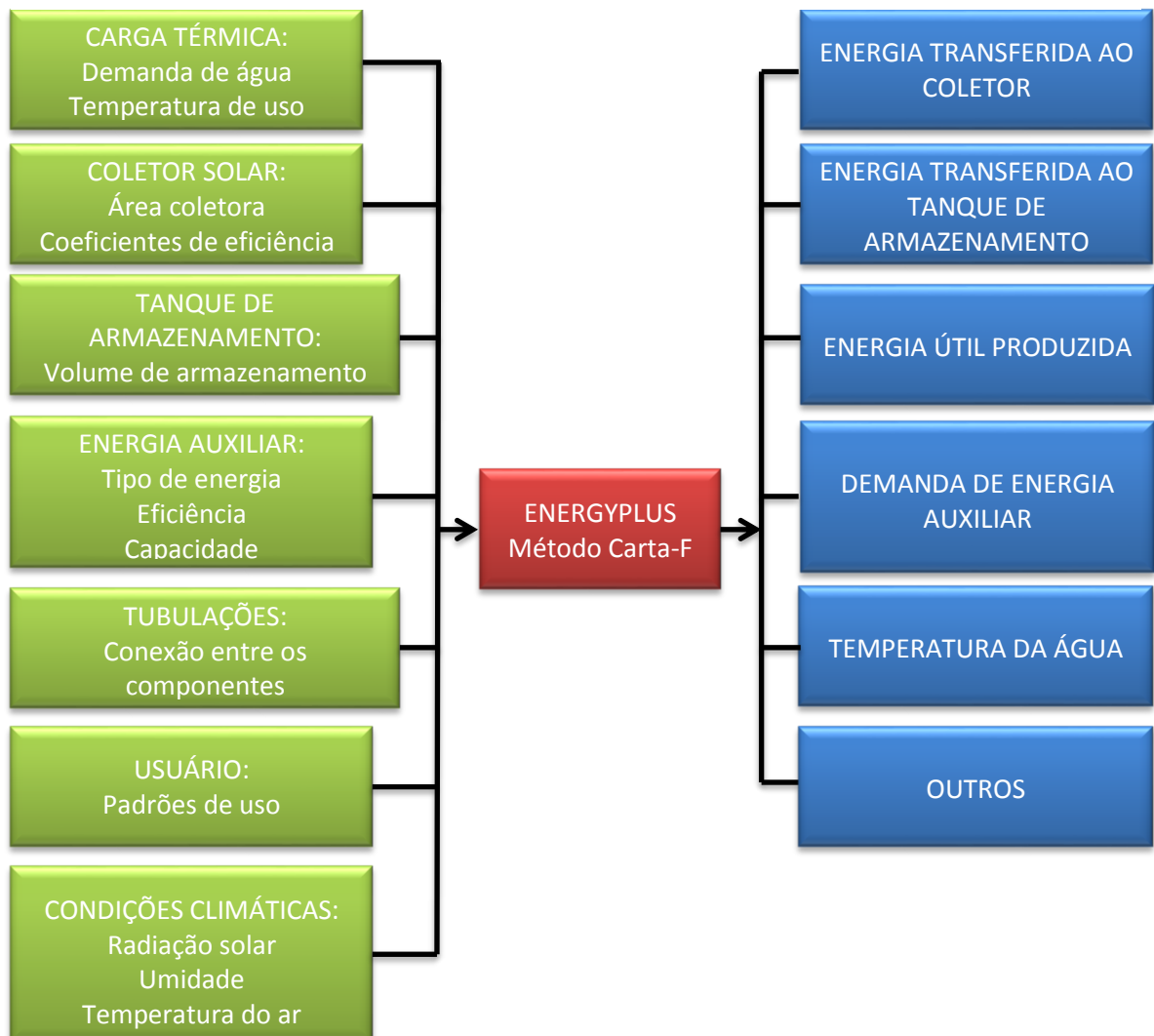
Fonte: Adaptado de Altoé *et al.*, (2013) e Shrivastava, Kumar e Untawale, (2017).

Os dados são estruturados em entradas e saídas, conforme Figura 4. As saídas podem ser configuradas para diferentes intervalos de tempo, de acordo às necessidades do usuário (BOJIĆ *et al.*, 2011). O programa dispõe de uma biblioteca com arquivos de exemplo dos sistemas que é capaz de simular, servindo como

modelo básico. Existe também à disposição dos usuários um vasto banco de dados climáticos para inúmeras cidades em todo o mundo (SHRIVASTAVA; KUMAR; UNTAWALE, 2017).

A Figura 4 apresenta as principais entradas e saídas do programa para a simulação de um sistema de aquecimento solar de água, bem como o método de cálculo da eficiência energética do sistema, desenvolvido por Beckman *et al.* (1977) (ALTOÉ *et al.*, 2013). O procedimento de modelagem será descrito adiante no método de pesquisa.

Figura 4 – Fluxograma de entradas e saídas para simulação de SAS no programa EnergyPlus.



Fonte: Adaptado de Altoé *et al.* (2013)

A concepção do modelo do sistema é crucial para que a simulação se aproxime da realidade. É preciso ter em vista que não há uma única maneira de

retratar um dado sistema, e sua representação sempre será uma cópia imperfeita da realidade (KALOGIROU; PAPAMARCOU, 2000). De modo geral, os problemas mais comuns na modelagem referem-se às incertezas relativas à precisão das especificações do sistema, às simplificações ou suposições de processos físicos, à quantidade de dados de entrada e às interações com elementos externos, como condições climáticas e comportamento dos usuários do sistema (WIT; AUGENBROE, 2002; COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014). Além disso, as lacunas nos métodos de simulação computacional para estudos específicos, como aquecimento solar de água, bem como as dificuldades no trato com os programas de simulação, são entraves na construção de modelos confiáveis.

Neste sentido, é importante validar a simulação a fim de aumentar sua credibilidade. O procedimento consiste na comparação dos resultados simulados com outros obtidos a partir de medições experimentais, de simulação com algoritmos matemáticos ou ainda a partir da simulação computacional em outros programas. Uma modelagem validada pode ser utilizada com segurança em outros estudos para aprimorar o desempenho de sistema.

Kalogirou e Papamarcou (2000) simularam com o programa TRNSYS o comportamento de um sistema de aquecimento solar de água com coletores de placa plana, reservatório térmico horizontal e circulação natural. Dados foram inseridos no programa como inclinação, orientação e indicadores de desempenho dos coletores, volume do tanque de armazenamento, distância entre os componentes, comprimento dos circuitos hidráulicos, entre outras especificações técnicas. Para a simulação, um arquivo climático do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY) foi modificado com a substituição de dados de radiação, temperatura ambiente e velocidade do ar, coletados no experimento realizado na cidade de Nicosia, Chipre. O sistema simulado foi validado a partir da comparação com medidas de temperatura média da água no reservatório térmico de um sistema monitorado. A diferença entre as temperaturas do início (8:00h) e final do dia (16:00h) foi utilizada como parâmetro de validação. O procedimento foi conduzido durante um número não consecutivo de dias entre dezembro e maio, desconsiderando o uso do sistema para fins de simplificação da validação. No estudo, o erro máximo relativo entre os resultados medidos e simulados foi de 21.3%, enquanto que o erro médio, para os vinte e cinco dias de validação, foi de 4.7%, considerado aceitável para validar o modelo simulado.

Salazar (2004) estabeleceu uma metodologia para avaliar o potencial de economia de energia elétrica e redução no pico da curva de demanda no horário de ponta, através do uso de sistemas de aquecimento solar de água. A partir da análise de dados obtidos de medições *in situ*, o autor procedeu com a avaliação da otimização econômica de alguns parâmetros construtivos utilizando o programa TRNSYS para simular um sistema de aquecimento solar de água e extrapolar o consumo anual de energia para as medidas propostas. O modelo simulado foi validado a partir da comparação com parâmetros de temperatura, variação de energia interna e energia útil. A validação foi realizada para um período de seis dias e foi utilizada a Raiz do Erro Quadrático Médio (RSMD) para determinar a acurácia dos valores simulados. Neste procedimento, em oposição ao estabelecido no estudo anterior, o sistema foi considerado em uso, pois segundo o autor a configuração utilizada em Kalogirou e Papamarcou (2000) não avalia o comportamento real do coletor solar e do reservatório térmico com consumo de água.

Abdunnabi *et al.* (2014) conduziram um estudo com propósito de chegar a um modelo representativo de um sistema de aquecimento solar de água com circulação forçada para utilizá-lo em análises de aperfeiçoamento de alguns parâmetros. Para isso foi necessário identificar o grau de precisão do programa TRNSYS em simular o sistema sob diferentes condições climáticas e de operação. Os autores validaram o modelo simulado a partir de dados medidos em um experimento conduzido durante seis dias na cidade de Tajoura, Líbia. Foram comparados quatro parâmetros: temperatura da água na entrada e saída do coletor, temperatura da água quente drenada para uso, e energia útil acumulada. A discrepância média entre os resultados simulados e medidos foi de 20.3% para o parâmetro energia útil acumulada, 16.0% para temperatura da água drenada para uso, e 13.5% para a temperatura da água na saída do coletor. O trabalho concluiu que o programa fornece previsões satisfatórias do comportamento do sistema.

Kazdaba *et al.* (2017) validaram a simulação de um sistema de aquecimento solar de água com coletores solares de placa plana e circulação forçada utilizando dados experimentais aferidos em Rabat, Marrocos, durante quatro dias. Assim como nos estudos anteriores, para validar a simulação realizada no programa TRNSYS, foram comparados os resultados de temperatura média do tanque de armazenamento, temperatura do coletor, energia útil coletada, e energia armazenada no tanque. O erro médio relativo entre a simulação e os dados experimentais foi de

12.5% para temperatura do coletor, 2% para a temperatura média do reservatório, 3% para energia coletada, e 9% para energia armazenada no tanque. Segundo os autores, o modelo simulado subestimou a temperatura média do coletor, do tanque de armazenamento e a energia armazenada no tanque em 2.0%, 2.2%, e 1.96%, respectivamente, e superestimou a energia coletada em 4%.

Guo *et al.* (2015) analisaram o desempenho de um coletor solar trifuncional fotovoltaico/térmico (PV/T), capaz de gerar eletricidade, aquecimento de água e de ambiente. Sob diferentes condições de vazão, velocidade do vento, temperatura de entrada de água e do ar, os autores simularam numericamente e validaram a modelagem do sistema em estudo utilizando a Raiz do Erro Quadrático Médio dos resultados simulados e obtidos em medições experimentais realizadas em Hefei, China. Foram comparados diversos parâmetros calculados para intervalos de 30 segundos, das 8:00h às 16:00h durante um dia. O artigo constatou uma boa consistência entre os resultados experimentais e simulados. A Raiz do Erro Quadrático Médio da eficiência térmica e das temperaturas de entrada e saída do coletor foram de 3.2%, 4.6% e 4.7%, respectivamente, considerando o sistema no modo PV/ aquecimento de água.

Bastos, Torres e Álvarez (2018) simularam numericamente uma bomba de calor assistida por energia solar. Assim como no trabalho anterior, os autores validaram a modelagem do sistema através do erro médio entre valores de temperatura e pressão simulados com dados coletados experimentalmente. A partir desse procedimento os autores puderam identificar as possíveis causas nas discrepâncias da modelagem numérica com o experimento.

Estudos abordando outros assuntos apresentam métodos de validação para simulações realizadas no programa EnergyPlus. Zhou *et al.* (2008) simulou o comportamento de um sistema de condicionamento de ar com volume de refrigerante variável (VRV). A simulação baseou-se no modelo experimental instalado no Laboratório de Termodinâmica da Universidade de Jiaotong em Shanghai, China. Aquecedores elétricos e humidificadores foram inseridos no ambiente de forma a simular a dissipação de calor pelos usuários, além da instalação de diversos termômetros para monitorar as variações de temperatura. Os experimentos foram conduzidos durante uma semana, em dias consecutivos. O consumo de energia do sistema, a energia para resfriamento, o coeficiente de performance (COP) e a temperatura dos ambientes monitorados foram comparados aos resultados da

simulação. Observado o erro relativo médio dos parâmetros, os autores concluíram que a precisão da simulação do comportamento do sistema depende do refinamento da modelagem, não apenas no que diz respeito à precisão dos dados característicos do sistema, mas também àqueles relativos às condições climáticas e às interfaces com o usuário e o ambiente construído.

Pereira, Bögl e Natschläger (2014) simularam a resposta térmica de uma casa situada na Áustria, utilizando o EnergyPlus. Os autores validaram a modelagem ao realizar uma análise de sensibilidade focada na introdução de perturbações nas propriedades da envoltória e nos dados climáticos para medir seu efeito na temperatura interna do ar, a fim de compatibilizar a simulação com os resultados medidos experimentalmente. O estudo demonstrou que o uso de dados climáticos mais precisos pode melhorar o ajuste da simulação com as condições reais.

Dentre os estudos levantados, Kalogirou e Papamarcou (2000) foram os únicos a abordar a validação de sistemas de aquecimento solar com características similares aos SAS utilizados no Brasil, embora a tenham feito desconsiderando a influência do consumo. A modelagem destes sistemas no programa EnergyPlus não é usual, uma vez que este software foi desenvolvido pensando nos sistemas ativos, comuns à países de clima frio. Por esta razão, a validação de modelos elaborados no programa EnergyPlus é ainda mais relevante para garantir a confiabilidade da simulação de sistemas por termossifão.

Por fim, de modo geral a revisão bibliográfica demonstrou que o desempenho dos sistemas de aquecimento solar de água sofre influência de diversos aspectos que estão atrelados às interfaces que o sistema possui com o usuário e o ambiente construído. Há uma carência de estudos que abordem o SAS com este enfoque abrangente, especialmente no Brasil onde não é conhecido o comportamento do sistema para as características climáticas e particularidades culturais dos usuários brasileiros.

### 3 METODO DE PESQUISA

Com base nos aspectos observados na revisão bibliográfica, percebeu-se que muitas vezes as condições reais e ideais de uso de um sistema de aquecimento solar de água podem divergir por razão de restrições do ambiente construído. Dessa forma, este trabalho analisou o desempenho de um SAS, em diferentes condições climáticas, considerando algumas limitações construtivas e pré-requisitos dos usuários. Através de simulações computacionais, foi analisada a sensibilidade do desempenho do sistema às variações dos parâmetros construtivos e de uso, a fim de identificar aqueles mais influentes no aprimoramento do SAS, de modo que seja possível contornar ou minimizar as restrições impostas.

O método é iniciado com o detalhamento do sistema de aquecimento solar de água a ser estudado, as características do ambiente construído em que está inserido, e os padrões de utilização. Em seguida, os parâmetros levantados ao longo da revisão bibliográfica foram caracterizados. Posteriormente, foi justificada a escolha do programa de simulação computacional EnergyPlus, e descritos os aspectos da modelagem do SAS por meio da exposição das características relevantes e as limitações encontradas na sua concepção. O modelo foi validado a partir de dados medidos e em seguida é exposto o método de análise das três condições limitantes do sistema escolhidas neste estudo.

#### 3.1 DELINEAMENTO DO OBJETO DE ESTUDO

Este estudo pretende restringir suas análises aos parâmetros relativos a interface do sistema de aquecimento solar de água com o ambiente construído e o usuário, preterindo a exploração dos parâmetros técnicos, aqueles relativos as especificações dos componentes do sistema. É entendido que a infinidade de trabalhos que discutem o aprimoramento do desempenho dos SAS a partir dos aspectos técnicos levou à consolidação da tecnologia e, portanto, não se faz necessário considera-los aqui. Desse modo, os parâmetros técnicos dos componentes do SAS serão fixados.

O recorte deste trabalho estará focado em três situações distintas em que os SAS se encontram em condições limitantes. Estas condições foram escolhidas com base em observações dos estudos de caso de Mendonça (2009), Santos e Rütther (2009), Giglio (2015), e do estudo de Vieira *et al.* (2018), em que foi possível identificar alguns entraves para instalação de SAS os quais estão descritos adiante:

- Limitações da cobertura quanto à instalação do reservatório térmico abrigado no ático;
- Limitações da cobertura quanto à instalação do coletor solar voltado para a melhor orientação (norte geográfico);
- Limitações da cobertura quanto à instalação do coletor solar com a melhor inclinação.

Em seguida serão exploradas modificações para contornar estas limitações e melhorar o desempenho do SAS a partir de variações em outros parâmetros. Este método será melhor explicado no item 3.5.

Para que os resultados de desempenho observados a partir das modificações dos parâmetros construtivos e de uso sejam uma expressão fiel destas modificações, é preciso que as variáveis que permanecerão fixas (parâmetros técnicos) se mantenham iguais para todas as configurações adotadas. As únicas exceções são os coeficientes de ganho ótico e perdas térmicas que caracterizam o coletor solar. Estes foram escolhidos de acordo com as características climáticas das cidades estudadas.

Assim sendo, os sistemas de aquecimento solar analisados nesta pesquisa seguem o modelo descrito no item 2.2 da revisão bibliográfica. São compostos por coletores solares de placa plana situados abaixo da cota de apoio do reservatório térmico. O dimensionamento da área coletora seguirá relações de volume e área coletora ( $V_{ar}/A_c$ ) que serão discutidas adiante.

Os coletores solares integrantes dos modelos são etiquetados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO), e possuem a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) com nível A de eficiência. Para a simulação computacional não é levada em conta a produção média mensal de energia assim como a composição dos coletores. Os efeitos dessas características são expressos em função do coeficiente de ganho ótico, coeficiente de perdas térmicas e a taxa de vazão mássica.

Foram selecionados dois tipos de coletores solares: o primeiro foi utilizado nas simulações das cidades de São Paulo e Porto Alegre enquanto que o segundo foi aplicado nas simulações realizadas em Belém. O coletor das cidades de São Paulo e Porto Alegre apresenta coeficiente de ganho ótico ( $F_R(\tau\alpha)_n$ ) igual a 0,764 e coeficiente de perdas térmicas ( $F_RU_L$ ) igual a 1,29 W/m<sup>2</sup>K. Para Belém, o coletor possui  $F_R(\tau\alpha)_n$  igual a 0,739 e  $F_RU_L$  igual a 5,051 W/m<sup>2</sup>K. A aplicação se restringiu ao

aquecimento de água para o banho. Estes coletores resistem à temperatura de estagnação e pressão de trabalho, e são constituídos de materiais resistentes à corrosão. Foi escolhido um coletor solar menos eficiente para a cidade de Belém com o objetivo de destacar os resultados do estudo, uma vez que o coletor adotado em São Paulo e Porto Alegre resultaria na máxima eficiência do SAS em Belém, dificultando as análises do efeito das variações dos parâmetros.

Os tanques de armazenamentos também são etiquetados pelo PBE, são isolados termicamente e apresentam perda específica de energia mensal variando entre 0,17 e 0,19 kWh/mês/l, a depender do volume armazenado. O dimensionamento do volume de armazenamento obedece ao método de cálculo da NBR 15569. Este método foi escolhido em detrimento do RTQ-R porque permite especificar a vazão de uso no ponto de consumo, parâmetro de interesse neste estudo. Segundo a NBR 15569 o volume do reservatório térmico é calculado a partir das Equações 5 e 6 a seguir:

$$V_{armaz} = \frac{V_{consumo} \cdot (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armaz} - T_{ambiente})} \quad (5)$$

Onde:

$V_{consumo}$  é o volume total de água quente consumido em m<sup>3</sup>;

$T_{consumo}$  é a temperatura final da água para banho, definida em 40°C para as cidades de São Paulo e Porto Alegre e 38°C para a cidade de Belém, conforme recomendado pelo RTQ-R;

$T_{ambiente}$  é temperatura ambiente média anual em °C.

$T_{armaz}$  é a temperatura de armazenamento no tanque, definida em 42°C neste estudo.

$$V_{consumo} = \sum(Q_{pu} \cdot T_u \cdot \text{frequência de uso}) \quad (6)$$

Onde:

$Q_{pu}$  é a vazão do ponto de utilização dado em L/min;

$T_u$  é o tempo médio de uso diário expresso em minutos;

A frequência de uso é o número total de utilizações da peça por dia.

As propriedades dos condutores hidráulicos do circuito secundário não foram estudadas, adotando-se tubos de CPVC isolados com lã de vidro de condutividade térmica ( $\lambda$ ) igual a 0.04W/mK.

Quanto ao tipo de *backup*, foram utilizados ou um aquecedor de instantâneo (chuveiro elétrico) ou um aquecedor de acumulação (resistência elétrica inserida no reservatório térmico). Para os casos em que foi estudado o uso do aquecedor de passagem enquanto fonte auxiliar de energia, a potência do equipamento empregado foi a menor possível, em conformidade com a região geográfica do sistema simulado, de acordo com a Tabela 5 fornecida pelo INMETRO.

Tabela 5 – Consumo de energia de chuveiros elétricos.

CLASSE DE POTÊNCIA	POTÊNCIA (W)	UTILIZAÇÃO
<b>A</b>	$P \leq 2400$	Preferencialmente região de climas mais quentes, como a região Norte.
<b>B</b>	$2400 < P \leq 3500$	
<b>C</b>	$3500 < P \leq 4600$	
<b>D</b>	$4600 < P \leq 5700$	Preferencialmente região de climas médios a quentes, como as regiões Nordeste e Centro-Oeste.
<b>E</b>	$5700 < P \leq 6800$	
<b>F</b>	$6800 < P \leq 7900$	Preferencialmente região de climas mais frios, como as regiões Sul e Sudeste.
<b>G</b>	$P > 9000$	

Fonte: Adaptado de BRASIL, (2016b).

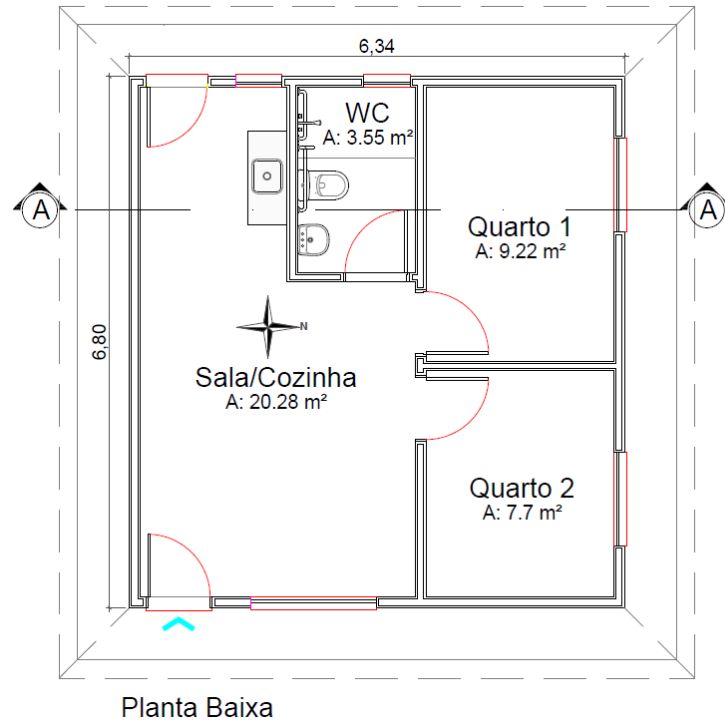
Desse modo, adotou-se para a cidade de Belém um chuveiro com potência igual a 3.500W e para as cidades de São Paulo e Porto Alegre 7.000W.

Para os casos em que o aquecimento auxiliar foi realizado com um aquecedor de acumulação, a potência da resistência elétrica foi igual a 3.000W em Belém e 4.000W em São Paulo e Porto Alegre.

### 3.1.1 Características construtivas da habitação

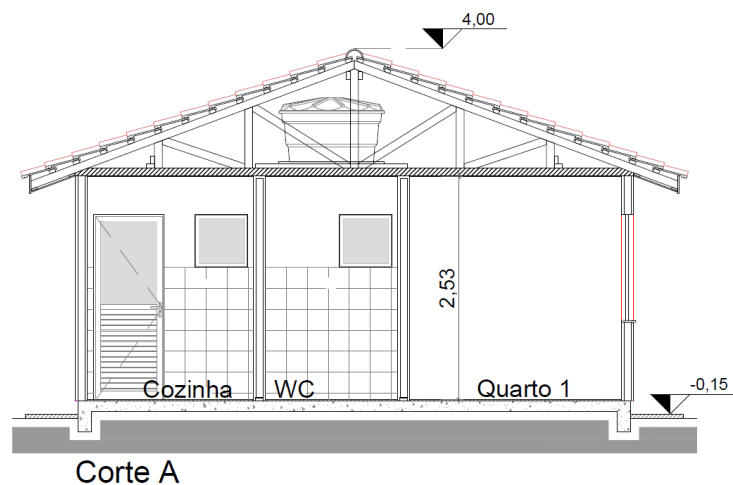
Neste estudo, o sistema de aquecimento solar atende a uma casa com características de habitação de interesse social, conforme indicado pela Figura 5. Esta habitação possui cobertura em telha cerâmica de cor natural – absorvância solar ( $\alpha$ ) igual a 0,75 – e está localizada no campus da Universidade Estadual de Londrina. Admitiu-se um padrão de ocupação de dois usuários por quarto, em conformidade com o número médio de pessoas por domicílio apontado pela Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (IBGE 2014). Os banhos ocorrem uma vez por dia com duração média de 10 minutos.

Figura 5 – Planta baixa de uma habitação de interesse social (sem escala).



A Figura 6 apresenta um corte da planta baixa com a indicação dos caimentos da cobertura, voltados para Norte e Sul. Esta habitação foi utilizada no estudo como modelo para obtenção da temperatura média do ar no interior do ático com o objetivo de alimentar as simulações para os casos em que o reservatório térmico estiver abrigado no ático. Desta forma, o tipo de sistema construtivo da envoltória não terá impacto significativo na simulação, somente a composição da cobertura.

Figura 6 – Corte A (sem escala).



### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

As interfaces do sistema de aquecimento solar podem ser determinantes para seu desempenho final. Diversos parâmetros do SAS foram apresentados na revisão bibliográfica, alguns deles com forte ligação com os aspectos tecnológicos de seus componentes, outros são afetados pelas condições do ambiente construído e pelo modo como o usuário opera o sistema. Em alguns casos, percebe-se que um mesmo parâmetro possui mais de uma interface, o que ocorre por exemplo com o volume do reservatório térmico, dependente da demanda de água quente e das características da cobertura.

Na Tabela 6, todos os parâmetros observados ao longo da revisão bibliográfica foram classificados em uma das três categorias já apresentadas: o ambiente construído, o usuário e a tecnologia. Essa classificação é necessária para deliberar qual a interface é mais influente no desempenho global do sistema.

Tabela 6 – Classificação dos parâmetros do sistema.

PARÂMETROS CONSTRUTIVOS	PARÂMETROS DE USO	PARÂMETROS TÉCNICOS
Volume de armazenamento	Tempo de banho	Isolamento do reservatório térmico
Geometria do tanque de armazenamento	Frequência de banho	Perda de calor do reservatório térmico
Relação $V_{ar}/A_c$	Horário de banho	Modificador de ângulo de incidência
Área coletora	Intervalo entre os banhos	Coefficiente de ganho óptico do coletor ( $F_R(\tau\alpha)_n$ )
Inclinação do coletor ( $\beta$ )	Vazão do chuveiro (nível de conforto)	Coefficiente de perdas térmicas do coletor ( $F_R U_L$ )
Orientação do coletor ( $\gamma$ )		
Índice de sombreamento da área coletora		
Backup		
Comprimento do circuito hidráulico		
Isolamento do circuito hidráulico		
Relação L/DN		
Nível de acúmulo de poeira		

As variáveis climáticas não são abordadas como parâmetros, mas fazem parte deste estudo. As análises dos SAS foram realizadas para três cidades brasileiras

escolhidas em função da latitude, de modo que estas representem todo território nacional, e da relevância deste estudo para estas cidades:

- Belém, latitude 01°27'21" S, I<sub>G</sub> 4,9 kWh/m<sup>2</sup>.dia;
- São Paulo, latitude 23°32'51" S, I<sub>G</sub> 4,5 kWh/m<sup>2</sup>.dia;
- Porto Alegre, latitude 30°01'59" S, I<sub>G</sub> 4,4 kWh/m<sup>2</sup>.dia.

O tempo demandado para realizar as simulações, e as dificuldades encontradas ao longo do processo de modelagem foram limitantes para seleção dos parâmetros a serem estudados.

Foram selecionados sete parâmetros de natureza construtiva e dois de uso. A Tabela 7 lista as variações que serão discutidas a seguir. Como estes parâmetros não são estocásticos, ou seja, não sofrem alterações imprevisíveis ao longo do tempo, a determinação das variabilidades se fundamentou em indicações de estudos prévios.

Tabela 7 – Variações dos parâmetros de análise do sistema.

	Localização do Tanque	Fora do ático	Dentro do ático					
	<b>PARÂMETROS CONSTRUTIVOS</b>	V <sub>tanque</sub> (L)	200L	250L	300L			
Orientação do coletor ( $\gamma$ )		N	30°NO	60°NO	O	30°NE	60°NE	L
Inclinação do coletor ( $\beta$ )		$\Phi$	$\varphi+10^\circ$	$i^a$				
Relação $V_{ar}/A_c$		55L/m <sup>2</sup>	70L/m <sup>2</sup>	85L/m <sup>2</sup>	100L/m <sup>2</sup>			
Isolamento do circuito primário		Isolado	Não isolado					
Tipo de <i>backup</i>		Aquecedor de acumulação	Aquecedor instantâneo					
<b>PARÂMETROS DE USO</b>		Nível de conforto do banho	4L/min	6L/min	8L/min			
	Horário de banho	Manhã	Tarde	Noite				

<sup>a</sup> Inclinação da cobertura.

A localização do tanque de armazenamento térmico na cobertura, no que tange a exposição às condições climáticas externas, requer atenção, como é pontuado pela NBR 15569. No Termo de Referência de instalação de SAS do programa MCMV, é recomendado que, quando possível, o reservatório térmico esteja abrigado no ático. Além disso, não foram encontrados estudos que comparem os efeitos das condições de abrigo deste componente no desempenho do sistema. Por essas razões, esse é um parâmetro de interesse neste trabalho.

O volume do tanque de armazenamento foi apontado pela revisão como parâmetro sensibilizante do desempenho do sistema devido a susceptibilidade às perdas térmicas, à sua capacidade de armazenamento de energia, e aos níveis de estratificação. Os estudos elencados na revisão analisaram reservatórios térmicos com volumes variando entre 90 de 330L. Tendo em vista os volumes disponíveis no mercado brasileiro e a demanda de água quente em domicílios unifamiliares, para esta análise foram selecionados três volumes: 200, 250 e 300L.

A orientação e inclinação do coletor solar influenciam diretamente no ganho de energia do sistema. Embora a recomendação técnica da NBR 15569 especifique que a orientação dos coletores deve variar no máximo 30° a leste ou oeste do norte geográfico, e a inclinação em até  $\varphi+10^\circ$ , as limitações impostas pelas características da cobertura e condições de sombreamento das edificações do entorno podem tornar inviável o atendimento a esses critérios. Por conta disso, foram analisadas sete orientações, variando de Leste a Oeste com intervalos de 30° entre elas, e três inclinações variando conforme a latitude local ( $\varphi$ ), a latitude local mais dez graus ( $\varphi+10^\circ$ ), e a inclinação da cobertura ( $i$ ). Esta última foi estabelecida como 20°, a partir de indicações do trabalho de Santos e Rüther (2009).

No que tange à relação volume armazenado e área coletora, os estudos de Duffie e Beckman (1991) apud Shariah e Löf (1996), Hobbi e Siddiqui (2009) e Kalogirou (2009a) chegaram a um consenso de que a relação ideal está entre 50 e 75L/m<sup>2</sup>, embora as habitações do programa MCMV trabalhem com a relação fixada em 100L/m<sup>2</sup>. Para este estudo foram definidas quatro variações, entre 55 e 100L/m<sup>2</sup>.

A condição de isolamento do circuito primário também foi avaliada. Apesar da NBR 15569 determinar o uso de isolamento térmico dos circuitos hidráulicos, em SAS do programa MCMV são utilizados tubos de EPDM no circuito primário, entre o coletor e o reservatório térmico, como foi relatado por Giglio (2015). O EPDM é uma borracha com condutividade térmica que varia entre 0,18 e 0,25

W/mK, sendo esta superior a de um tubo de CPVC que possui  $\lambda=0,14\text{W/mK}$ . Portanto, o parâmetro foi variado entre as condições isolado e não isolado.

O sistema de apoio ou *backup* foi avaliado para quantificar se há benefícios na substituição do aquecedor instantâneo (chuveiro elétrico) pelo aquecedor de acumulação (resistência elétrica instalada no interior do reservatório térmico). Para este último caso, a configuração da temperatura de armazenamento da água no reservatório foi estabelecida em 42°C em Belém e 45°C em São Paulo e Porto Alegre, desconsiderando a temperatura de controle de proliferação da bactéria *Legionella*. O aquecedor de acumulação foi programado para ser acionado com 1 hora de antecedência do período de banho.

O nível de conforto do banho é entendido nesta análise como uma exigência do usuário relativa a qualidade do banho e, tecnicamente, se resume à vazão do chuveiro. Embora classificado como parâmetro de uso, também possui uma relação estreita com o ambiente construído, uma vez que depende do dimensionamento do circuito hidráulico e do posicionamento dos reservatórios térmico e de água fria em relação ao ponto de consumo. Os níveis de conforto de banho foram variados em três vazões: 4, 6 e 8L/min. Estes valores são similares aos estabelecidos no estudo de Altoé, Filho e Carlo, (2012), além de estarem em conformidade com a recomendação da NBR 15569 para vazão de chuveiro.

Quanto a temperatura de água fria da rede de abastecimento, tentou-se obter estes dados junto às concessionárias SABESP (Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo), COSANPA (Companhia de Saneamento do Pará), e DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre) entretanto sem êxito. Desse modo foi seguida a recomendação do RTQ-R que sugere, para fins de cálculo da eficiência de SAS, que a temperatura de água fria seja igual a temperatura ambiente média mensal decrescida de 2°C.

Tabela 8 – Cronograma de banhos

<b>TURNO</b>	<b>HORÁRIO</b>
Manhã	7:00-7:40
Tarde	14:00-14:40
Noite	18:00-18:40

Por fim, foi estabelecido que os banhos ocorressem sem intervalos e concentrados em um dos três turnos, conforme indicado na Tabela 8.

No estudo de Giglio (2015) foi observado que a composição familiar e o entendimento do funcionamento da tecnologia refletem nas preferências quanto ao horário de banho.

### 3.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA NO PROGRAMA ENERGYPLUS

Como foi abordado na revisão bibliográfica, a simulação computacional é uma ferramenta útil para estudar o comportamento de sistemas que integram o ambiente construído e as interações entre essas interfaces. A escolha do programa EnergyPlus para estudar o desempenho de sistemas de aquecimento solar de água, especificamente a sua interação com o ambiente construído e o usuário, foi motivada pelo potencial do programa em permitir um elevado nível de detalhamento da maioria dos aspectos que afetam no desempenho desse sistema, bem como a diversidade de variáveis de resposta que podem ser obtidas para análise. Sua confiabilidade já foi atestada em diversos estudos por meio de validações. Além disso, o acesso gratuito e o aprimoramento periódico de versões anteriores favorecem sua utilização.

Em geral, modelagens realizadas no programa EnergyPlus podem ser complexas devido às dificuldades em lidar com sua interface, e ao grau de detalhamento exigido para obtenção de um modelo condizente com a realidade. O usuário tem a opção de recorrer a manuais disponibilizados pelo programa com informações sobre as entradas e saídas de dados para cada objeto, como uma espécie de dicionário do EnergyPlus. Há ainda o manual com as referências de engenharia onde são explicados os métodos de cálculo do programa. Em adição, é possível acessar um banco de arquivos com exemplares de modelos básicos dos diversos tipos de sistemas que podem ser simulados pelo EnergyPlus.

A modelagem do sistema de aquecimento solar foi iniciada a partir da representação do coletor solar. Esta representação é realizada no programa SketchUp<sup>5</sup>, no qual o usuário pode modelar o coletor solar de forma simplificada, através do desenho de uma superfície retangular, representando-o conforme sua

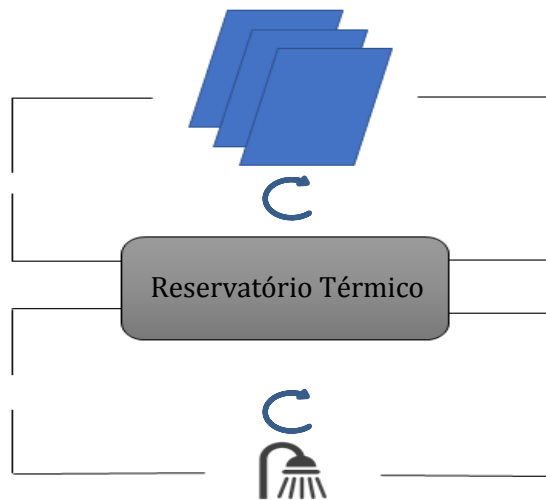
---

<sup>5</sup> A interface entre o SketchUp e o EnergyPlus é possível somente a partir da instalação de um *Plug-in* ou extensão chamado Euclid, que permite a interface entre os dois programas produzindo um arquivo do tipo .idf. Para que o modelo desenhado no ambiente do SketchUp possa ser interpretado corretamente pelo EnergyPlus, deve-se utilizar as ferramentas do Euclid em conjunto com o SketchUp durante sua criação

orientação ( $\gamma$ ) e inclinação ( $\beta$ ). A partir deste ponto, o arquivo com a representação da superfície do coletor foi carregado no EnergyPlus, versão 8.8.0, para configuração de diversos objetos que modelam um SAS.

De modo simplificado, a estrutura da modelagem de um sistema de aquecimento solar de água trabalha em função de *loops*. Os *loops* indicam processos em que ocorrem a circulação de fluidos. Nesta modelagem há dois *loops* acontecendo simultaneamente e ambos interagem com o reservatório térmico, como pode ser visto no esquema da Figura 7. O primeiro *loop* envolve o conjunto coletor-reservatório onde a água mais fria, localizada nos estratos inferiores do reservatório, segue para ser aquecida nos coletores e então retornar ao tanque de armazenamento reiniciando o *loop*. Neste *loop* estão incluídos todos os objetos que especificam os coletores, e as tubulações do circuito primário.

Figura 7 – Desenho esquemático da modelagem de um SAS no programa EnergyPlus.



Fonte: Adaptado de Vieira (2017).

O segundo *loop* consiste no conjunto reservatório-demanda. Nele, a medida em que a água quente, que ocupa os estratos superiores, é drenada para suprir a demanda, o reservatório térmico é reabastecido com água fria. No segundo *loop* foram configurados os objetos que especificam as condições das tubulações do circuito secundário, o sistema auxiliar de apoio, e os equipamentos dos pontos de consumo que, para este estudo se limita ao chuveiro. As principais configurações dos dois *loops* foram feitas através dos objetos *Sizing:Plant*, *PlantLoop*,

*PlantEquipmentList*, *PlantEquipmentOperation:HeatingLoad* e *PlantEquipmentOperationSchemes*.

A organização dos diversos componente do SAS ao longo de cada *loop* de interação foi realizada a partir de um sistema de ramos e nós ou *branches* e *nodes*. Os *branches* consistem nos componentes do SAS dispostos sequencialmente ao longo de um duto. Os *nodes* são responsáveis pela conexão desses componentes dentro de um mesmo *branch*. Todos os componentes dos SAS – coletores, tanque de armazenamento, *backup*, tubos, válvula misturadora, e equipamentos de uso final – encontram-se distribuídos em diversos *branches*.

Há ainda os objetos que determinam o modo como três ou mais *branches* se conectam. Quando estes conectores, ou *connectors*, juntam dois ou mais *branches* em um só, são denominados *mixers*. Quando dividem um único *branch* em dois ou mais, chamam-se *splitters*.

O componente coletor solar, conforme mencionado anteriormente, foi configurado a partir do seu desenho no *SketchUp*, através da atribuição de orientação, inclinação e área à uma superfície. Quando o arquivo é aberto no EnergyPlus, esta superfície aparece identificada através de suas coordenadas no objeto *Shading:Building:Detailed*. Para continuar configurando o coletor solar, são utilizados outros dois objetos para especificar os demais parâmetros. No objeto *SolarCollector:FlatPlate:Water*, podem ser definidas mais de uma placa coletora (caso seja necessário) as quais são identificadas com nomes distintos. A cada uma dessas placas foi atribuída uma superfície, indicada no objeto anterior, que carrega em si as informações de inclinação, orientação e área. A vazão máxima do coletor assumiu uma configuração padrão de valor igual a 0,00001m<sup>3</sup>/s. Como pode ser percebido, há uma relação de dependência entre os objetos os quais alimentam informações entre si.

O terceiro objeto *SolarCollectorPerformance:FlatPlate* solicita a entrada dos coeficientes de ganho ótico, perda de calor da placa coletora, modificador de ângulo de incidência e taxa de vazão mássica. De acordo com o manual de referências de engenharia do EnergyPlus, o programa atende aos padrões de desempenho de coletores estabelecidos pela ASHRAE (1989;1991) e a *Solar Rating and Certification Corporation* (SRCC 2003) que avalia coletores comerciais disponíveis na América do Norte. Assim, é possível calcular a eficiência dos coletores solares ( $\eta$ ) através de duas equações: uma delas admite uma correlação linear das perdas térmicas ( $F_{RUL}$ ) e a

outra uma correlação quadrática de ( $F_{RUL}$ ). Os coeficientes utilizados em correlações lineares e quadráticas traduzem os fenômenos de transferência de calor no coletor e são determinados empiricamente (VIEIRA *et al.*, 2016). Entretanto o INMETRO, órgão brasileiro responsável pela certificação dos coletores solares comercializados, até o período de realização desta pesquisa disponibilizava dados de somente um coeficiente de perdas térmicas<sup>6</sup>. Portanto, neste trabalho foi utilizada a correlação linear, conforme apresentada na Equação (7):

$$\eta = c_0 + c_1 \frac{(T_{in} - T_{ar})}{I_{solar}} \quad (7)$$

Onde:

$c_0$  é o coeficiente de ganho ótico ( $F_R(\tau\alpha)_n$ );

$c_1$  é o coeficiente de perdas térmicas

$T_{in}$  é a temperatura de entrada da água;

$T_{ar}$  é a temperatura do ar externo;

$I_{solar}$  é a radiação solar total incidente.

Esta equação de eficiência é representada por uma reta decrescente, visto que o coeficiente de perdas térmicas é negativo. Isso significa que a eficiência do coletor diminui com o aumento da variação de temperatura ou a redução da radiação solar incidente.

Para o cálculo das variações da transmitância do coletor em diferentes ângulos de incidência da radiação solar, também será utilizada a equação linear do modificador de ângulo de incidência, expressa por (8):

$$K_{\tau\alpha} = 1 + b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (8)$$

Onde:

$K_{\tau\alpha}$  é o modificador de ângulo de incidência;

$b_0$  é coeficiente modificador linear do ângulo de incidência;

$\theta$  é o ângulo de incidência da radiação.

---

<sup>6</sup> De acordo com a Portaria do INMETRO n°229 de agosto de 2018, passará a vigor como requisito para o registro e certificação de coletores solares fechados a publicação dos coeficientes de caracterização da curva de eficiência ( $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ).

Assim, no objeto *SolarCollectorPerformance:FlatPlate*, foram inseridos somente os coeficientes  $c_0$ ,  $c_1$  e  $b_0$ .

O reservatório térmico do SAS deste estudo consiste em um tanque de armazenamento horizontal e estratificado. O objeto *WaterHeating:Stratified* foi utilizado para configurá-lo. Neste objeto, são determinados o formato, a altura e volume do tanque de armazenamento assim como a potência da resistência elétrica que trabalha como fonte auxiliar de energia (quando não for previsto esse tipo de *backup* o valor da resistência é configurado em 0 W). As alturas dos pontos de entrada e saída de água também foram configuradas. Admitiu-se que a entrada de água quente que vem do coletor e a saída de água quente para consumo estão a aproximadamente 0,55m acima do fundo do tanque. A entrada de água fria da rede de abastecimento e a saída de água que vai para o coletor foram alocadas no fundo do tanque (0 m). A temperatura de água fria foi determinada a partir de um cronograma mensal criado em outro objeto. Já o nível de estratificação do reservatório térmico foi configurado a partir da divisão em seis extratos.

O programa permite configurar as perdas de calor do tanque para o ambiente em que se encontra exposto – o ático de uma cobertura ou o ambiente externo. Para reservatórios acondicionados no ático, foi utilizado um cronograma ou *Schedule* com as temperaturas horárias ao longo do ano. Estas temperaturas foram obtidas a partir da modelagem da habitação de interesse social descrita no item 3.1.1. Para o caso de exposição ao ambiente externo, foram utilizados os dados de temperatura do ar ambiente fornecidos pelo arquivo climático, em base horária.

A simulação de um modelo normalmente é realizada com o auxílio de um arquivo climático configurado com diversas informações detalhadas de variáveis climáticas de um dado local, registradas em base horária nas estações climatológicas. Contêm dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade, precipitação, velocidade e direção dos ventos, pressão barométrica, entre outros, ao longo das 8760 horas de um ano. Para este trabalho foram utilizados arquivos climáticos do tipo TRY (Test Reference Year) conhecido como ano climático de referência, o qual contém dados de valores médios ao longo de um ano, excluídos os valores extremos (CARLO; LAMBERTS, 2005).

Os objetos do grupo *Water System* foram utilizados para configurar a vazão do chuveiro e especificar os cronogramas que apresentam os horários e temperatura de banho. Quando necessário utilizar o chuveiro elétrico como *backup* do

sistema de aquecimento solar, o objeto *WaterHeater:Mixed* é utilizado. Nele é possível determinar a potência da resistência elétrica do chuveiro, sua eficiência, o limite máximo de temperatura permitido, e a temperatura mínima da água para a qual o chuveiro deverá ser acionado complementando o aquecimento. Nesta modelagem também foi programado um misturador termostático a fim de evitar queimaduras durante o uso. O modelo não dispõe de válvula anticongelamento<sup>7</sup>.

### 3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO DE SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR

A fim de assegurar a representatividade, a modelagem foi validada com base em alguns dos critérios adotados nos trabalhos de Kalogirou e Papamarcou (2000), Salazar (2004) e Guo *et al.* (2015). O procedimento consistiu na comparação de dados de um indicador de desempenho, adquiridos a partir da medição de um sistema de aquecimento solar em uso com os resultados da simulação deste sistema nas mesmas condições. Esta comparação foi avaliada a partir da Raiz do Erro Quadrático Médio relativo (RMSE), dada pela Equação (9), conforme Guo *et al.* (2015):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_{sim} - x_{med}) / x_{med}]^2}{n}} \quad (9)$$

Onde:

$x_{sim}$  é o valor do indicador de desempenho obtido por simulação;

$x_{med}$  é o valor do indicador de desempenho obtido por medição;

$n$  é o número total de amostras.

O indicador de desempenho escolhido nesta validação foi a temperatura de água quente do reservatório térmico próximo ao ponto de saída para atender a demanda. A simulação foi programada para gerar dados de saída de temperatura da água por minuto, do mesmo modo como foi registrado nas medições do SAS monitorado. Em seguida, foram calculadas as temperaturas médias para cada hora ao longo dos sete dias de validação. As características do sistema monitorado, bem como as variáveis climáticas e demais critérios de validação serão abordados adiante.

---

<sup>7</sup> No EnergyPlus é possível utilizar fluidos de trabalho anticongelantes como propilenoglicol e etilenoglicol. No entanto eles são aplicados em sistemas de aquecimento solar de circuito indireto, muito utilizados em países de clima frio (MENDONÇA, 2009).

### 3.4.1 Descrição do sistema monitorado

Os dados de temperatura de água quente utilizados para validar a modelagem foram obtidos a partir da pesquisa de Giglio (2015). No referido trabalho, cinco habitações equipadas com sistemas de aquecimento solar de água foram monitoradas no intervalo de um ano, entre abril de 2013 e março de 2014. As casas fazem parte de um conjunto habitacional, localizado na cidade de Londrina, financiado pelo programa habitacional Minha Casa Minha Vida. O objetivo principal da pesquisa foi identificar a influência do comportamento dos usuários na economia de energia elétrica proporcionada pelo uso do aquecedor solar. O monitoramento foi realizado a partir da instalação de sensores de temperatura e hidrômetro pulsado, distribuídos em pontos estratégicos do sistema e conectados a um sistema de aquisição e transferência remota de dados em tempo real. Os equipamentos foram calibrados após o período de medição para avaliar a precisão após o período prolongado de uso. Para aquisição dos dados de temperatura de saída de água quente do tanque de armazenamento, um dos sensores foi alocado no interior do tanque, próximo a saída de consumo, permanecendo submerso em água quente durante todo período. Os dados foram registrados por minuto. Os hidrômetros pulsados permitiram o registro do tempo de duração dos banhos e a distinção entre banho frios e quentes (com uso do SAS). Também foram obtidas temperaturas de água fria do sistema de abastecimento, em média mensal.

Dentre as cinco habitações monitoradas, foi selecionada para validação aquela que obteve os melhores resultados de economia de energia. Neste domicílio, que possui apenas um banheiro, o SAS é composto por um coletor solar de placa única, plana, com área bruta de 2,11m<sup>2</sup> e área útil de 1,94m<sup>2</sup>, sem interferência de sombreamento pelo entorno. O coletor possui coeficiente de ganho óptico ( $F_R(\tau\alpha)_n$ ) igual a 0,649 e coeficiente de perdas térmicas ( $F_R U_L$ ) igual a 6,297 W/m<sup>2</sup>K. O coletor solar está instalado na cobertura, localizado na água norte e alocado sobre uma estrutura de suporte que permite o desvio azimutal ( $\gamma$ ) de +16° e inclinação ( $\beta$ ) de 43,1°.

O tanque de armazenamento está posicionado na parte externa da cobertura, acima da cota de apoio do coletor solar. Possui capacidade de 200 litros, constituído de aço inox e isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS). Apresenta perda específica de energia igual a 0,19 kWh/mês/litro. A caixa redutora de

pressão, responsável pelo abastecimento de água fria, fica alocada sobre o tanque de armazenamento e apresenta capacidade de 22 litros. Embora o uso de isolamento térmico das tubulações seja compulsório, o circuito primário, aquele que conecta o coletor e o reservatório, é composto de mangueiras de borracha de etileno-propileno-dieno (EPDM), sem isolamento térmico. O EPDM apresenta condutividade térmica entre 0,18 e 0,25W/mK. Não há informações a respeito da composição do circuito secundário. Neste caso foi assumido que os tubos são de CPVC, com diâmetro nominal igual a 20mm.

O sistema dispõe ainda de uma válvula anticongelamento, programada para escoar a água do coletor quando esta alcançar temperaturas inferiores a 12°C. O conjunto coletor-tanque está posicionado logo acima do local de banho, de forma a reduzir o comprimento da tubulação e perdas de carga.

A habitação é ocupada por quatro usuários, dois adultos e duas crianças, com maiores inclinações para banhos curtos durante a noite, e nível de conforto de banho de alcance máximo de 4,5L/min.

### **3.4.2 Seleção dos dias de validação**

Nos estudos de Kalogirou e Papamarcou (2000), Salazar (2004) e Abdunnabi *et al.* (2014), a validação da modelagem foi realizada em períodos distintos – vinte e cinco dias no primeiro estudo e seis dias nos outros dois – sem critérios de seleção e, em um dos casos, em dias não consecutivos. Neste trabalho foi definido um intervalo de sete dias distribuídos em dois períodos durante os solstícios de verão e inverno a fim de observar o comportamento do modelo para duas situações extremas.

Diante da exigência do programa EnergyPlus em determinar uma temperatura inicial para o tanque de armazenamento, para o caso de simulações em dias específicos, foi configurada uma temperatura a partir da 0:00 hora. Desse modo, a seleção dos dias de validação foi condicionada a observação dos dados medidos do sistema monitorado para atender a este requisito. Assim, a validação foi realizada para os dias 12, 13 e 14 de julho de 2013, e 21, 22, 23 e 24 de dezembro de 2013, quando a temperatura de saída do reservatório térmico do sistema medido foi registrada próximo de 50°C à 0:00 hora, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Temperatura do reservatório térmico do sistema monitorado.

	12/JUL	13/JUL	14/JUL	21/DEZ	22/DEZ	23/DEZ	24/DEZ
<b>T (°C) ÀS 0:00H</b>	50,51	49,34	49,17	50,68	52,00	54,03	49,28

As temperaturas de água fria da rede de abastecimento, obtidas em média mensal no estudo de Giglio (2015), foram de 18,53 e 27,15°C para os meses de julho e dezembro, respectivamente.

A Tabela 10 apresenta os registros de tempo e horário de ocorrência dos banhos e vazão do chuveiro, observados no sistema monitorado. Os dados da Tabela 10 se limitam a banhos com uso do sistema de aquecimento solar, embora outros eventos de banhos frios tenham sido registrados ao longo do período. Para o dia 22 de dezembro, por exemplo, entre às 20:28h e 20:48h foi registrado um banho exclusivamente com água fria.

Tabela 10 - Cronograma de banhos registrados no SAS medido.

<b>12/Jul</b>	Banho	20:51 a 20:58	21:03a 21:06	21:12 a 21:20	22:00 a 22:12	22:17 a 22:21	22:27 a 22:31	
	vazão (L/min)	3,0	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2	
<b>13/Jul</b>	Banho	19:52 a 19:55	21:09 a 21:15	21:53 a 22:01	22:24 a 22:30			
	Vazão	2,5	4,0	3,2	3,0			
<b>14/Jul</b>	Banho	15:05 a 15:12	15:14 a 15:19	15:22 a 15:24	18:02 a 18:08	18:17 a 18:25		
	vazão (L/min)	3,0	3,2	3,0	3,3	3,2		
<b>21/Dez</b>	Banho	00:20 a 00:28	09:10 a 09:15	09:20 a 09:23	15:40 a 15:51	16:02 a 16:06	20:36 a 20:44	21:38 a 21:42
	vazão (L/min)	3,1	3,3	3,0	3,3	2,8	2,7	3,4
<b>22/Dez</b>	Banho	22:59 a 23:04						
	vazão (L/min)	2,7						
<b>23/Dez</b>	Banho	08:24 a 08:29	08:34- 08:36	08:40 a 08:44	08:55 a 08:59	09:10 a 09:16	19:29 a 19:42	
	vazão (L/min)	2,5	2,7	3,0	3,4	3,3	3,2	
<b>24/Dez</b>	Banho	18:03 a 18:09	19:30 a 19:33	20:12 a 20:18	20:56 a 21:01	21:03 a 21:06		
	vazão (L/min)	2,9	2,8	3,2	2,7	2,5		

Os dados registrados do sistema em uso demonstraram que a vazão do chuveiro oscilava ao longo do banho, o que foi atribuído à operação de mistura da água para atingir a temperatura e volume de conforto. A vazão média, registrada entre os banhos do referido período e adotada na modelagem, foi de 3,1 litros por minuto.

### **3.4.3 Variáveis climáticas e particularidades da modelagem**

A fidelidade na reprodução das condições climática é fundamental para conformidade dos resultados de desempenho de um sistema simulado com os resultados de um sistema monitorado. Em uma simulação computacional, usualmente é utilizado o arquivo climático da cidade onde está localizado o sistema que se deseja investigar. Entretanto não existem arquivos climáticos disponíveis para todas as cidades. Em alguns casos, para efeito de estimativa, são utilizados arquivos de cidades com características climáticas similares, ou ainda pode-se proceder com a entrada manual de alguns dados climáticos. Assim, para validar este modelo, foram levantados os dados climáticos da região durante o período em que ocorreu a medição do sistema observado, buscando uma maior aproximação das condições reais de radiação solar e temperatura do ar.

Para a inserção manual das variáveis climáticas, o modelo sofreu algumas modificações. A mais relevante foi a substituição do objeto *RunPeriod* pelo objeto *SizingPeriod:DesignDay*, o qual permite inserir manualmente diversos dados como radiação solar, velocidade e direção do vento, pressão barométrica, temperatura de bulbo seco e critério de condição de umidade. Além disso, esse objeto permite realizar simulações em períodos específicos, ou seja, a modelagem é configurada para ocorrer dia a dia, durante o período desejado pelo usuário do programa. Entretanto a simulação não acontece de forma contínua. Em outras palavras, embora a simulação possa ser programada para ocorrer em dias consecutivos, à 0:00h de cada dia de simulação o programa reiniciará as configurações preestabelecidas do sistema. Em termos da variável de saída de interesse nesta validação, a temperatura de água quente na saída do reservatório térmico, esta temperatura sempre será reiniciada para 50°C à 0:00h de cada dia simulado. Foi possível minimizar a discrepância inicial entre a temperatura de água quente entre a modelagem e a medição através do condicionamento da seleção dos dias de validação à temperatura de água quente do sistema medido, conforme explicado no tópico anterior.

No objeto *SizingPeriod:DesignDay*, a velocidade e direção do vento, pressão barométrica ou atmosférica, e condição de umidade do dia são constantes. Assim, é possível inserir um único valor para cada dia simulado. O programa permite ainda estabelecer qual condição de umidade o usuário deseja assumir. O modo padrão recomenda o uso da temperatura de bulbo úmido. Já a temperatura de bulbo seco, segundo o manual de entradas e saídas de dados do EnergyPlus, é calculada a partir de uma curva de distribuição de multiplicadores baseada na ASHRAE-HOF 2009<sup>8</sup>, que atribui uma temperatura de ar para cada intervalo de tempo predeterminado, utilizando os valores de temperatura máxima de bulbo seco e amplitude máxima diária indicados pelo usuário. Todos estes dados climáticos estão elencados no Anexo A.

Os dados de radiação solar são solicitados pelo objeto *SizingPeriod:DesignDay* através da indicação de cronogramas de distribuição horária das parcelas direta e difusa<sup>9</sup> de radiação no plano horizontal para cada um dos dias simulado. Os cronogramas podem ser criados no objeto *Schedule:Day:Hourly*. Entretanto, ao longo do processo de coleta de dados no trabalho de Giglio (2015), foram registrados dados de radiação global no plano de inclinação do coletor, assim como o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) disponibiliza somente dados de radiação global no plano horizontal. Segundo Zamadei (2015), a maioria das estações meteorológicas brasileiras monitora apenas a radiação global devido aos custos de aquisição e operação de sensores, ficando a cargo de modelos matemáticos a estimativa das componentes difusa e direta. Modelos matemáticos estatísticos são representados por equações ajustadas através de regressões em correlações de dados de insolação obtidos por estações climatológicas. Em virtude da ausência de um modelo de correlação em base horária adequado para a cidade de Londrina, este trabalho utilizou a correlação de Erbs *et al.* (1982)<sup>10</sup> para calcular as parcelas direta e

---

<sup>8</sup> A ASHRAE-HOF é o banco de dados para projeto de condições climáticas mais amplamente utilizado por profissionais que trabalham com sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar de edificações (MOURSHED, 2016).

<sup>9</sup> A radiação solar total ou global que incide em uma superfície pode ser fracionada em três parcelas: direta, difusa, e refletida pelo solo ou albedo. A parcela direta é aquela que alcança uma superfície sem ter sido dispersada atmosfera. A parcela difusa consiste na parte da radiação que sofreu atenuação da atmosfera antes de atingir uma dada superfície. O albedo é a parcela final de radiação que chega até uma superfície após ser refletida pelo solo (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Para o plano horizontal desconsidera-se a parcela do albedo.

<sup>10</sup> Liu e Jordan (1960) foram os primeiros a relatar a existência de uma correlação entre a fração difusa da radiação solar ( $I_d$ ) em uma superfície horizontal e o índice de claridade ( $k_T$ ), desenvolvendo um modelo matemático a partir de dados climáticos da cidade de Blue Hill em Massachusetts, EUA (JACOVIDES *et al.*, 1996).

difusa da radiação solar, a partir dos dados de radiação global no plano horizontal apresentados no Anexo A. Esta correlação foi escolhida em virtude da simplicidade do método e equivalência a outros dois métodos conhecidos: Orgill e Holland (1977) e Reindl *et al.* (1990a) (DUFFIU E BECKMAN, 2006). As Equações de 10 a 14 são desdobramentos necessários para o cálculo das parcelas direta e difusa da radiação global.

A correlação de Erbs *et al.* (1982) satisfaz a seguinte condição:

$$\begin{aligned} \text{Para } k_T \leq 0,22; & \quad \frac{I_d}{I} = 1,0 - 0,09k_T \\ \text{Para } 0,22 < k_T \leq 0,80; & \quad \frac{I_d}{I} = 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 \\ \text{Para } k_T > 0,80; & \quad \frac{I_d}{I} = 0,165 \end{aligned}$$

Onde:

$I_d$  é a fração difusa da radiação solar em  $W/m^2$ ;

$I$  é a radiação global no plano horizontal em  $W/m^2$ ;

$k_T$  é o índice de claridade horário, calculado a partir da Equação (10):

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (10)$$

Onde:

$I_0$  é a radiação extraterrestre<sup>11</sup> calculada a partir da Equação (11):

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{SC} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cdot \left[ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (11)$$

Onde:

$G_{SC}$  é a constante solar igual a  $1367 W/m^2$ ;

$n$  é número do dia do ano, o qual varia de 1 a 365;

$\phi$  é a latitude local;

$\delta$  é a declinação do sol, dada pela Equação (12);

$\omega$  é o ângulo horário<sup>12</sup>.

---

Outros modelos de correlação surgiram posteriormente como o modelo de Erbs *et al.* (1982), adaptado a partir de dados de estações climatológicas dos Estados Unidos e Austrália (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

<sup>11</sup> A radiação extraterrestre consiste na radiação que chegaria a Terra na ausência da atmosfera.

<sup>12</sup> O ângulo horário é o deslocamento do sol a leste ou oeste do meridiano local devido a rotação da Terra em seu próprio eixo a 15 graus por hora. Os valores durante a manhã são negativos e a tarde positivos (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \quad (12)$$

Para B calculado pela Equação (13)

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (13)$$

Após o cálculo da parcela difusa ( $I_d$ ) da radiação solar, determina-se a parcela direta ( $I_b$ ) utilizando a Equação (14):

$$I_b = I - I_d \quad (14)$$

As equações do índice de claridade horário ( $k_T$ ), da radiação extraterrestre ( $I_0$ ), da declinação do sol ( $\delta$ ), do termo B, e da radiação direta ( $I_b$ ) estão definidas em Duffie e Beckman (2006). O Apêndice A exibe os resultados dos cálculos das parcelas difusa ( $I_d$ ) e direta ( $I_b$ )<sup>13</sup> da radiação global no plano horizontal.

Por fim, a condição de exposição do tanque armazenamento às variações da temperatura ambiente foram inseridas na modelagem em base horária. Os dados dessa variável de entrada são apresentados no anexo A.

### 3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE MULTIPARAMETRICA

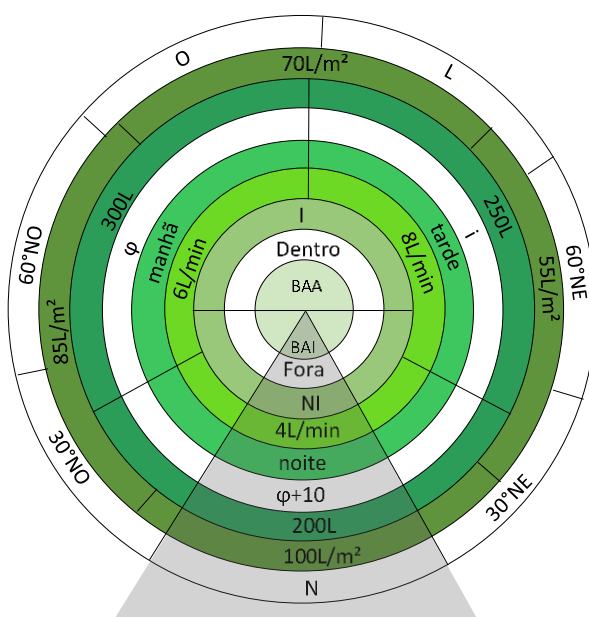
Afim de aprimorar o desempenho dos sistemas de aquecimento solar de água submetidos a diferentes condições limitantes, neste estudo foi empregado o método de análise de sensibilidade multiparamétrica. Este método, adaptado do trabalho de Vieira *et al.* (2018), consiste na observação da sensibilização de indicadores de desempenho às variações de diversos parâmetros que interagem com um dado sistema. A análise foi útil para identificar quais parâmetros construtivos e de uso demandam atenção e sensibilizam mais os indicadores de desempenho do SAS em estudo, a fração solar e o consumo de energia.

Conforme foi explicado no delineamento do objeto de estudo, entre os nove parâmetros definidos, foram selecionados três deles, como condições limitantes a fim de avaliar as interfaces do SAS em condições reais de aplicação.

<sup>13</sup> O índice b, utilizado para designar radiação direta, corresponde a grafia em inglês: beam.

A Figura 8 apresenta o esquema do método de análise. Cada setor circular do esquema corresponde a um dos nove parâmetros analisados neste estudo. Estes parâmetros variam de acordo com a Tabela 7. A área sombreada do desenho esquemático indica qual a configuração do SAS está sendo analisada. Esta configuração pode ser modificada a partir da rotação dos setores circulares de cada um dos parâmetros.

Figura 8 – Desenho esquemático do método de configuração dos parâmetros para análise.



BAA	<i>Backup</i> aquecedor de acumulação
BAI	<i>Backup</i> aquecedor de instantâneo
NI	Circuito não isolado
I	Circuito isolado
i	Inclinação do coletor coincidente com cobertura
$\varphi$	Inclinação do coletor igual a latitude local
$\varphi+10^\circ$	Inclinação do coletor igual a latitude local mais 10 graus

Os setores circulares na cor branco destacam as três condições limitantes avaliadas neste trabalho. A imposição de uma condição limitante significa que um determinado parâmetro será fixado. Fixando-o e variando os demais parâmetros (conforme Tabela 7), um por vez, é possível identificar quais deles sensibilizam o indicador de eficiência. Desta forma pode-se saber de que maneira implementar as melhorias de compensação dessas limitações e quais as perdas na fração solar para o uso do SAS em uma condição de limitação do ambiente construído.

Tomando como exemplo a condição limitante “localização do reservatório térmico”, deseja-se conhecer de que forma é possível aumentar a fração solar, ou reduzir o consumo de energia do sistema caso o reservatório térmico esteja localizado fora do ático ou dentro do ático. Partindo da configuração de referência indicada pela Tabela 11, a localização do tanque é travada em “fora” e o tipo de

*backup* elétrico será variado em “aquecedor de acumulação” e “aquecedor instantâneo”, mantendo as demais configurações iguais à referencial. Para variar o parâmetro basta compreender que seu setor circular está rotacionando de forma que a configuração desejada se posicione sob a área sombreada. Logo em seguida o *backup* retorna para a configuração de referência e o tipo de isolamento é variado em “isolado” e “não isolado”, com a manutenção dos demais parâmetros iguais condição referencial. O processo continua até que todos os oito parâmetros tenham sido variados, mantendo-se a limitação da localização do reservatório posicionado fora do ático. Em seguida será travada a posição “dentro” e todo processo se repete. Com isso é possível entender quais parâmetros sensibilizam mais a fração solar do sistema, em uma condição não desejada, em que o reservatório está exposto fora do ático e compará-la com a condição desejável na qual o reservatório térmico encontra-se dentro do ático.

Para analisar individualmente a sensibilidade do sistema à variação de cada um dos parâmetros é preciso que os demais sejam fixados. Desta forma, para estabelecer uma referência, foi escolhida uma configuração espelhada nos valores dos parâmetros observados em SAS comuns às habitações de interesse social, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Configuração de referência da análise de sensibilidade.

<b>Localização do Tanque</b>	fora do ático
<b>V<sub>tanque</sub> (L)</b>	200L
<b>Orientação do coletor (<math>\gamma</math>)</b>	N
<b>Inclinação do coletor (<math>\beta</math>)</b>	$\varphi+10^\circ$
<b>Relação V<sub>ar</sub>/A<sub>c</sub></b>	100L/m <sup>2</sup>
<b>Isolamento do circuito primário</b>	Não isolado (NI)
<b>Tipo de <i>backup</i></b>	BAI
<b>Nível de conforto do banho</b>	4L/min
<b>Horário de banho</b>	Noite

Dando continuidade à análise, foi avaliado o parâmetro inclinação do coletor, a segunda condição limitante destacada na Figura 8. O mesmo procedimento é desenvolvido: partindo da configuração de referência estabelecida na Tabela 11, é fixada uma inclinação e variados os demais parâmetros, um por vez. Finalizada a primeira inclinação, o processo se repete para as outras duas.

Por fim, foi avaliada a última condição limitante, a orientação do coletor. Todos os sete níveis de orientação foram fixados, um a um, para proceder com a variação dos demais parâmetros. Nesta última análise pode-se determinar de que modo é possível melhorar a fração solar do sistema de aquecimento de água, caso só haja a possibilidade de instalação do coletor solar em uma dessas orientações. E em quais variações os indicadores fração solar e consumo de energia podem sofrer com esta interferência.

As análises foram conduzidas para as cidades de Belém, São Paulo e Porto Alegre. A variação dos parâmetros para as três cidades resultou em 140 simulações computacionais para cada cidade, totalizando 420 casos. Foram utilizados como indicadores de eficiência do sistema a fração solar anual do sistema e consumo de energia em kWh.

As três análises conduzidas para três condições climáticas distintas permitiram conhecer em quais locais os parâmetros construtivos influenciam mais no desempenho e em quais deles as condições de uso são mais influentes na fração solar do sistema. Ainda foi possível determinar quais limitações prejudicam mais a economia de energia proporcionada pela tecnologia.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validar a modelagem, as temperaturas de água quente na saída do reservatório térmico foram comparadas com os dados registrados no sistema monitorado. As Figuras 9 e 10 apresentam as curvas de distribuição das temperaturas de água quente ao longo de cada dia de validação contendo os resultados da simulação e os dados de medição do sistema de aquecimento solar monitorado. A Tabela 12 complementa as informações destes gráficos com os valores absolutos das diferenças horárias de temperatura de água quente. Diferenças positivas implicam que a simulação superestima a medição, e diferenças negativas indicam que os resultados da simulação subestimam os dados reais. O gráfico de barras contido na Tabela 12 é um bom indicativo visual das tendências de afastamento, aproximação ou paralelismos entre as curvas de simulações e medições.

Figura 9 – Gráfico comparativo dos resultados de temperatura de água quente para os dias de inverno.

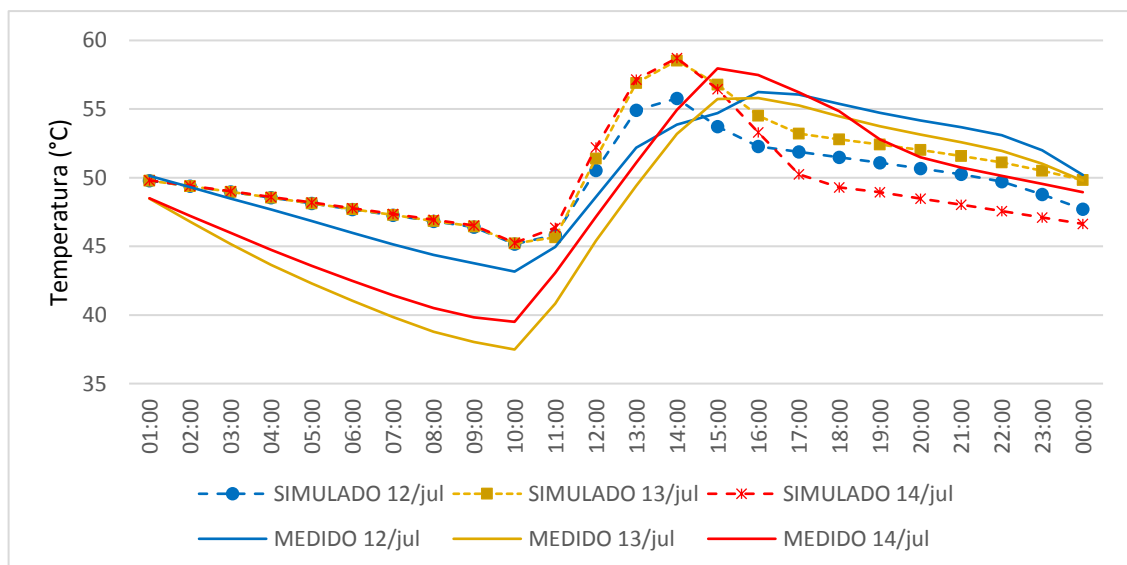
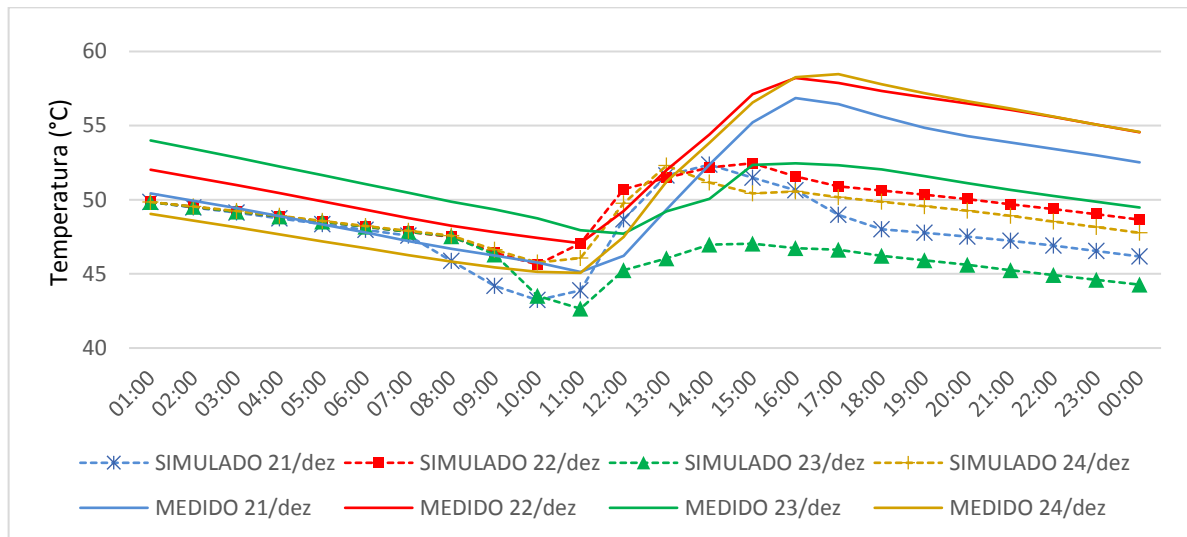


Figura 10 – Gráfico comparativo dos resultados de temperatura de água quente para os dias de verão.



Observando os pontos de inflexão das curvas na Figura 9 e Figura 10, pode-se afirmar que o comportamento do sistema simulado é similar ao sistema medido. Durante o inverno, as temperaturas de água quente ao fim da primeira hora de todos os dias divergiram em média 1°C entre a medição e a simulação, conforme a Tabela 12. No verão, esta variação foi maior somente nos dias 22 e 23 de dezembro, chegando a -2,2 e -4,2 °C. Isso é justificado pelo distanciamento da temperatura configurada na simulação para o reservatório térmico (50°C) e a temperatura de água quente no sistema medido à 0:00 hora que, nestes dois dias, foram registradas em 52 e 54°C, respectivamente.

Observando os períodos de ausência de radiação solar nas Figuras 9 e 10, antes das 8:00 e após as 18:00 horas, é visível que há um certo paralelismo entre as curvas da simulação e da medição, exceto durante as manhãs dos dias de inverno em que se percebe uma queda mais acentuada na temperatura da água do sistema monitorado. De acordo com a Tabela 12, entre 1:00 e 8:00 horas da manhã dos dias simulados para inverno, observa-se uma tendência maior de afastamento, com crescimento das diferenças de temperatura em até 6,8°C no dia 13 de julho. Para esta mesma análise nos dias de verão há uma maior equivalência entre a modelagem e o sistema monitorado, com variação máxima de 1,8°C no dia 23 de dezembro. Isto é um indício de que o modelo está subestimando as perdas de calor em condições climáticas mais rigorosas como acontece no inverno. A Tabela 26 contendo as

temperaturas médias ambiente, apresentada no Anexo A, mostra que durante a madrugada dos dias de validação no mês de julho a temperatura ambiente chegou a 12°C, enquanto que para os dias do mês de dezembro atingiu 19°C. Ajustes no coeficiente de perda de calor do tanque de armazenamento podem ajudar a reduzir estas diferenças.

Tabela 12 – Diferença absoluta da temperatura de água entre a simulação e dados de medição.

Hora/Dia	12/jul	13/jul	14/jul	21/dez	22/dez	23/dez	24/dez
01:00	-0,3	1,3	1,3	-0,6	-2,2	-4,2	0,8
02:00	0,1	2,6	2,2	-0,5	-2,0	-3,9	0,9
03:00	0,5	3,8	3,0	-0,3	-1,8	-3,6	1,1
04:00	0,9	4,9	3,9	-0,1	-1,6	-3,4	1,2
05:00	1,3	5,8	4,6	0,0	-1,4	-3,1	1,4
06:00	1,7	6,7	5,3	0,2	-1,2	-2,9	1,5
07:00	2,1	7,4	5,9	0,4	-0,9	-2,6	1,6
08:00	2,5	8,1	6,4	-0,8	-0,7	-2,4	1,8
09:00	2,6	8,4	6,7	-2,0	-1,4	-3,1	1,2
10:00	2,0	7,7	5,8	-2,5	-1,8	-5,2	0,6
11:00	0,8	4,8	3,3	-1,2	0,0	-5,3	1,0
12:00	1,9	6,0	5,1	2,5	1,5	-2,5	2,3
13:00	2,7	7,5	6,1	2,3	-0,5	-3,2	1,1
14:00	1,9	5,4	3,8	0,0	-2,2	-3,1	-2,7
15:00	-1,0	1,1	1,5	-3,7	-4,7	-5,3	-6,1
16:00	-4,0	-1,3	-4,2	-6,2	-6,6	-5,7	-7,7
17:00	-4,2	-2,0	-6,0	-7,5	-7,0	-5,7	-8,3
18:00	-3,9	-1,7	-5,5	-7,6	-6,7	-5,8	-7,9
19:00	-3,6	-1,3	-3,8	-7,1	-6,6	-5,7	-7,6
20:00	-3,5	-1,1	-3,0	-6,8	-6,4	-5,5	-7,4
21:00	-3,4	-1,0	-2,7	-6,6	-6,4	-5,4	-7,2
22:00	-3,4	-0,9	-2,5	-6,5	-6,2	-5,3	-7,1
23:00	-3,2	-0,5	-2,4	-6,4	-6,1	-5,3	-6,9
00:00	-2,5	0,1	-2,3	-6,3	-5,9	-5,2	-6,8

O gráfico de barras da Tabela 12 evidencia que durante a noite, período em que os usuários do sistema concentraram os banhos, o crescimento das diferenças absolutas de temperatura de água quente após às 18:00 horas não é brusco, alcançando no máximo 2,4°C no inverno e 1,3°C no verão. Embora esta tendência indique uma aproximação entre as curvas, o modelo continua subestimando as perdas durante a noite, porém, de forma mais discreta que nas manhãs dos dias de julho.

Ao longo do período de incidência solar, entre às 8:00 e 18:00 horas, comportamentos distintos são observados para os dias de verão e inverno. No inverno, Figura 9, há um deslocamento temporal do ponto de temperatura máxima de água quente. O sistema simulado apresenta curvas com picos de temperatura por volta das 14:00 horas enquanto que os picos do sistema medido ocorrem às 15:00 horas. As máximas temperaturas alcançadas, embora deslocadas no tempo, se aproximam em valor absoluto. No verão, Figura 10, também ocorre o deslocamento dos picos de temperatura para às 16:00 horas no sistema medido, e para 15:00 horas no sistema simulado. Além disso, as máximas temperaturas da água no sistema simulado estão em média 5,5°C abaixo daquelas do sistema monitorado.

O ganho reduzido de temperatura e o deslocamento das curvas do sistema simulado em relação ao sistema medido podem ser justificados pela não correspondência dos dados de radiação solar utilizados na simulação com os valores reais. Conforme foi elucidado na metodologia, o programa EnergyPlus requisita dados de radiação solar fragmentados em suas parcelas direta e difusa. Uma vez que só foi possível obter a radiação global para a cidade de Londrina durante o período da validação, um método que correlaciona o índice de claridade ( $k_T$ ) e a razão  $I/I_0$  foi utilizado para dividir a radiação global em suas parcelas direta e difusa. Entretanto, segundo Zamadei (2015), tais correlações apresentam grande variabilidade em função da partição temporal escolhida (horária, diária ou mensal), do local estudado e do tipo de ajuste. A correlação de Erbs *et al.* (1982) utilizada neste estudo, resulta de uma análise estatística de dados climatológicos de locais de média latitude, onde as características climáticas apresentam condições de claridade ( $k_T$ ) distintas das observadas em Londrina. Uma vez que a correlação permite calcular a radiação difusa em função do índice de claridade, é possível que esta distinção afete os valores da fração difusa e, por conseguinte, a fração direta que é a mais importante para o ganho de energia do coletor.

Para efeitos comparativos da forma da distribuição das radiações, são apresentadas nas Figuras de 11 a 14 as parcelas direta e difusa da radiação solar de Londrina, calculadas pela correlação de Erbs *et al.* (1982), e as parcelas da radiação solar de São Paulo, geradas pelo arquivo climático TRY desta cidade. Na Figura 11 nota-se que a distribuição da radiação difusa para a cidade de Londrina não apresenta a mesma forma parabólica observada para São Paulo. É possível que a correlação de Erbs *et al.* (1982) esteja superestimando a fração difusa entre às 6:00 e 11:00 horas

e entre as 14:00 e 16:00 horas, períodos em que são observados grandes picos. Uma vez que a radiação direta resulta da subtração da radiação global pela radiação difusa, nestes intervalos de tempo a radiação direta está sendo subestimada, como é visto na Figura 12. Estendendo esta observação à Figura 9, percebe-se que há uma redução no ganho de temperatura dos sistemas simulados que ocorre entre as 14:00 e 16:00 horas de forma mais brusca que a observada nas curvas do sistema observado.

Figura 11 – Gráfico de radiação difusa para os dias de inverno.

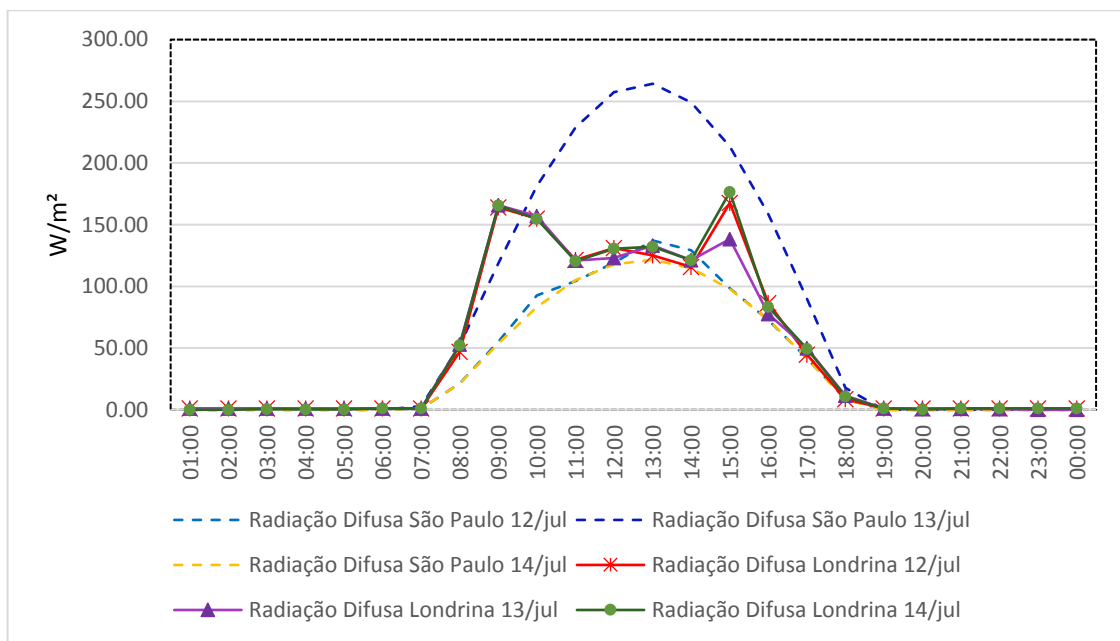
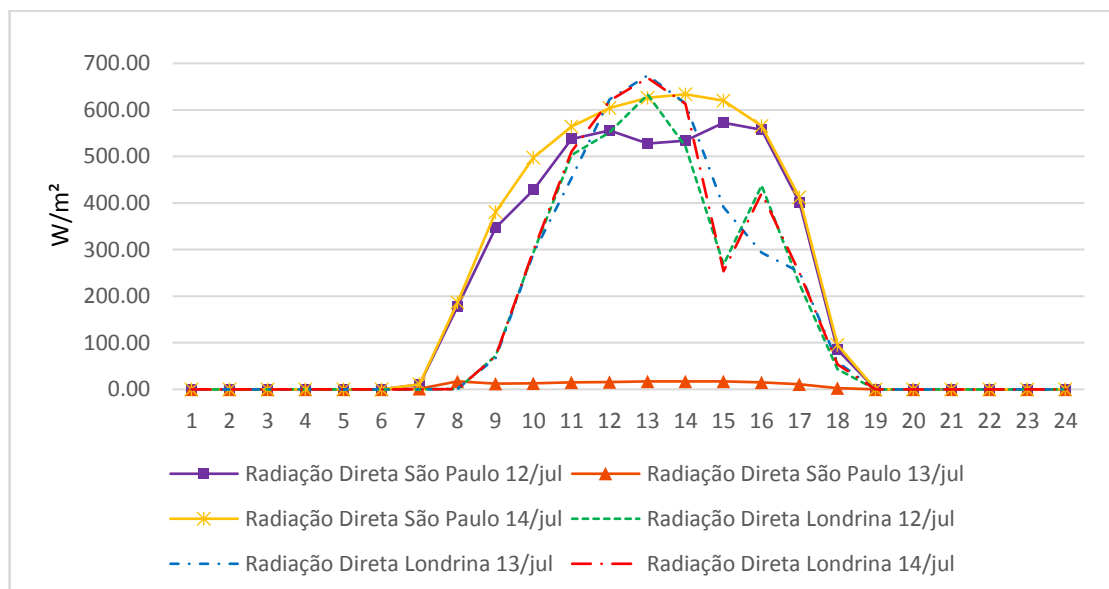


Figura 12 – Gráfico de radiação direta para os dias de inverno.





Para avaliar se o modelo se aproxima do sistema monitorado, utilizou-se a Raiz do Erro Quadrático Médio relativo (RMSE) como métrica estatística do desvio dos resultados da modelagem em relação ao SAS observado. Os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Raiz do Erro Quadrático Médio relativo.

<b>RMSD Geral</b>	8,60%
<b>RMSD inverno</b>	9,02%
<b>RMSD verão</b>	8,27%
<b>RMSD 12/Jul</b>	4,93%
<b>RMSD 13/Jul</b>	11,33%
<b>RMSD 14/Jul</b>	9,55%
<b>RMSD 21/Dez</b>	8,05%
<b>RMSD 22/Dez</b>	7,52%
<b>RMSD 23/Dez</b>	8,79%
<b>RMSD 24/Dez</b>	8,66%

Os estudos relatados na revisão bibliográfica que validaram modelos computacionais, divergiram nos diversos aspectos da validação adotando variáveis de saída distintas bem como número de dias de validação, intervalo de tempo ao longo do dia e métricas estatísticas de comparação dos resultados. Mesmo com distinções entre os métodos, é possível utiliza-los como comparativos para avaliar o desempenho desta validação.

Ao validar o modelo de um SAS simulado no programa TRNSYS, Kalogirou e Papamarcou (2000) obtiveram um erro relativo de 4,7% para os vinte e cinco dias de simulação. O erro relativo diário máximo foi de 21,3%. No trabalho de Salazar (2004) foram utilizadas três variáveis para validação da modelagem de um sistema de aquecimento solar de água. O autor concluiu que o erro máximo de 11% obtido na análise está dentro dos limites aceitáveis. No estudo de Abdunnabi *et al.* (2014) em que foi validado um modelo de sistema de aquecimento solar de água com circulação forçada, as discrepâncias máximas entre a modelagem e o sistema medido foram de 20,2%, 16% e 13,5% para três variáveis de saída observadas. Guo *et al.* (2015) durante a validação de um coletor solar tri-funcional (PV/T) obtiveram erros relativos da eficiência elétrica e térmica do sistema de 2,6% e 8,2%, respectivamente.

Percebe-se que o desempenho do modelo deste trabalho obteve resultados próximos ao dos estudos elencados. A raiz do erro quadrático médio para todos os dias de validação foi igual a 8,6%, e o erro máximo diário foi de 11,3%, o que

é considerado satisfatório. Portanto, pode-se afirmar que o comportamento do modelo do SAS simulado obteve boa conformidade com o sistema monitorado embora, o uso de uma correlação matemática adequada à cidade de Londrina para a obtenção das parcelas da radiação solar proporcionaria resultados mais precisos.

## 4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A seguir são apresentados os resultados da simulação dos sistemas de aquecimento solar de água para as três cidades propostas. O desempenho dos sistemas é representado pela fração solar anual e o consumo anual de energia elétrica pelo *backup*. Ao longo das análises são feitas menções à configuração de referência, baseada nas características de SAS utilizados em habitações de interesse social, conforme apresentado na Tabela 11, uma vez que todos os parâmetros que não estiverem sob análise se mantêm iguais a esta referência.

### 4.2.1 Limitação 01 – Orientação dos coletores solares

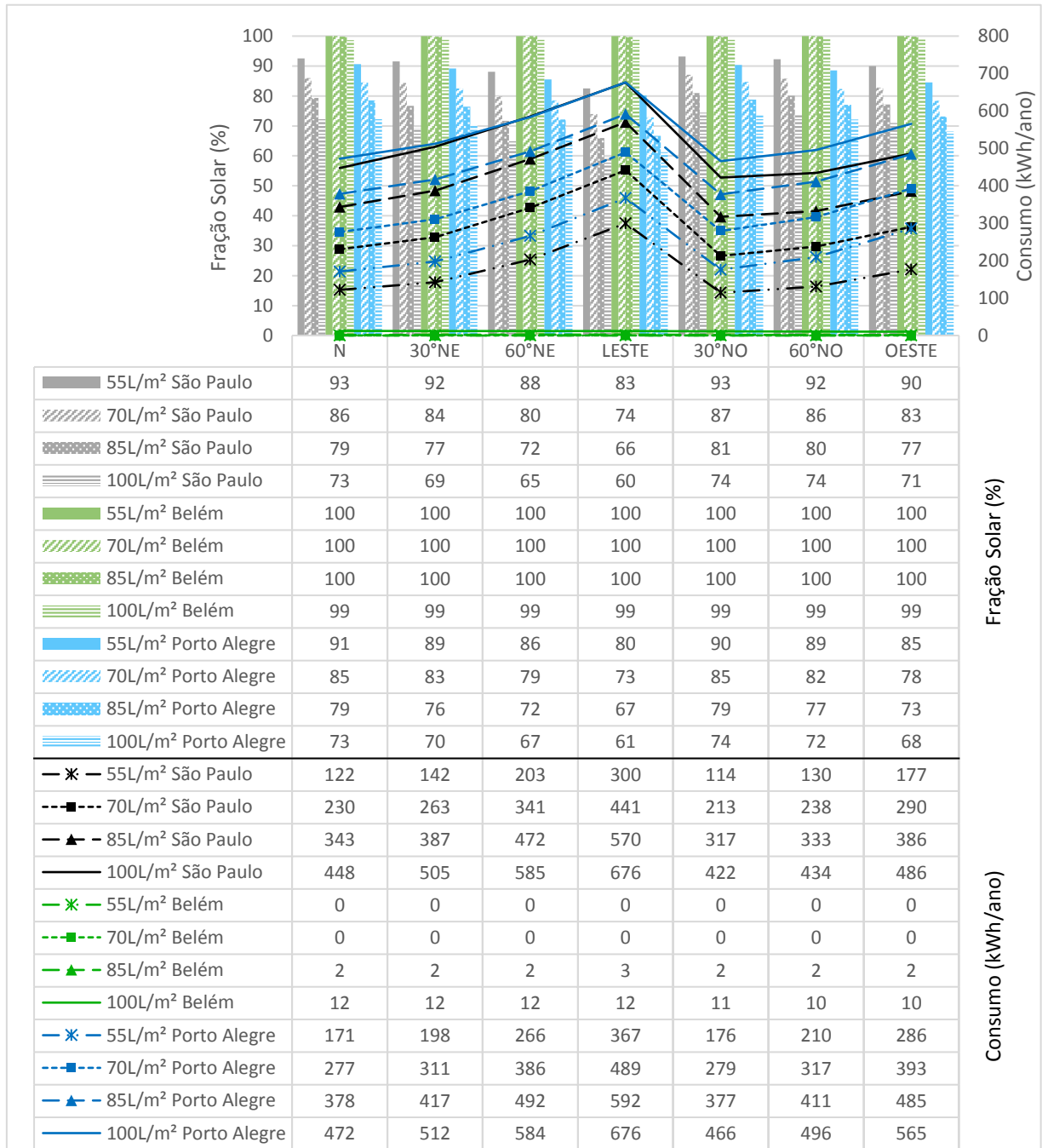
Adotando a ordem como os parâmetros estão dispostos no desenho esquemático da Figura 8, o primeiro parâmetro variado foi a relação volume armazenado / área coletora, apresentado na Figura 15, onde as barras representam a fração solar anual e as linhas o consumo total de energia pelo *backup*.

Pode-se observar que variações das orientações, para todas as relações  $V_{ar}/A_{col}$ , impactaram de forma significativa nos indicadores de desempenho do sistema para as cidades de São Paulo e Porto Alegre, enquanto em Belém as restrições na orientação do coletor solar não implicaram em alterações relevantes na fração solar do sistema que se manteve superior a 99%.

Em São Paulo, as orientações a Norte, 30°NO, 60°NO e Oeste apresentaram fração solar superior a 70% para todas as relações  $V_{ar}/A_{col}$ , percentual apontado pelo RTQ-R como mínimo para obtenção do máximo nível de eficiência desses sistemas. O melhor e pior resultados de desempenho foram obtidos para coletores voltados a 30°NO e Leste, respectivamente. Para a relação  $V_{ar}/A_{col}$  de 100L/m<sup>2</sup>, que é utilizada em habitações de interesse social do programa Minha Casa Minha Vida, os SAS com coletores voltados a 60°NE e Leste chegaram a apresentar consumo de energia anual 39% e 60% superior à melhor orientação (30°NO), respectivamente, de acordo com a Tabela 14. Neste caso, por exemplo, para que o consumo de energia de coletores orientados a Leste seja equivalente a orientação a

30°NO, seria necessário reduzir a relação  $V_{ar}/A_{col}$  para 70L/m<sup>2</sup> onerando assim o custo de implantação do sistema.

Figura 15 – Impacto da relação  $V_{ar}/A_{col}$  na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.



Em Belém a elevada taxa de incidência de radiação solar ao longo do ano, devido a sua localização geográfica, proporcionou maiores níveis de eficiência do sistema de aquecimento solar. Para esta análise as variações no indicador de desempenho fração solar foram imperceptíveis, e pouco relevantes no indicador consumo de energia. Em SAS com as orientações mais promissoras para essa cidade

(60°NO e Oeste) o consumo de energia pelo *backup* foi levemente inferior em comparação às demais orientações.

Em Porto Alegre, as orientações a Norte, 30°NE, 30°NO e 60°NO apresentaram fração solar igual ou superior a 70% para todas as relações  $V_{ar}/A_{col}$ , e as orientações a Norte e 30°NO proporcionaram o melhor desempenho do sistema, de acordo com a Figura 15. Assim como em São Paulo, sistemas com coletores orientados a 60°NE e Leste possuem o pior desempenho. SAS com estas orientações chegam a consumir de 25 a 45% mais energias que um sistema orientado a 30°NO, por exemplo. No estudo de Vieira *et al* (2018), em Brisbane, cidade australiana com latitude igual a 28,46° Sul, o sistema de aquecimento solar com características aproximadas ao sistema simulado neste trabalho, quando admitiu-se os coletores orientados a Leste ou Oeste, apresentou consumo de energia 81% superior a orientação a Norte, e 20% superior a esta mesma configuração quando orientados a 45° Nordeste ou Noroeste.

Tabela 14 – Incremento no consumo de energia em função da melhor orientação para cada relação  $V_{ar}/A_{col}$ .<sup>a</sup>

ORIENTAÇÃO		N	30NE	60NE	LESTE	30NO	60NO	OESTE
São Paulo	55L/m <sup>2</sup>	7%	24%	77%	162%	0%	14%	54%
	70L/m <sup>2</sup>	8%	24%	60%	108%	0%	12%	36%
	85L/m <sup>2</sup>	8%	22%	49%	80%	0%	5%	22%
	100L/m <sup>2</sup>	6%	20%	39%	60%	0%	3%	15%
Belém	55L/m <sup>2</sup>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	70L/m <sup>2</sup>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	85L/m <sup>2</sup>	16%	14%	20%	43%	4%	0%	13%
	100L/m <sup>2</sup>	21%	18%	16%	17%	12%	1%	0%
Porto Alegre	55L/m <sup>2</sup>	0%	16%	56%	115%	3%	23%	67%
	70L/m <sup>2</sup>	0%	12%	39%	77%	1%	14%	42%
	85L/m <sup>2</sup>	0%	11%	30%	57%	0%	9%	29%
	100L/m <sup>2</sup>	1%	10%	25%	45%	0%	6%	21%

<sup>a</sup> As orientações destacadas apresentam menor consumo de energia para uma mesma relação  $V_{ar}/A_{col}$ .

A Tabela 14 é um desdobramento da Figura 15 onde são apresentadas, em percentual, as oscilações no consumo de energia em função da orientação de melhor desempenho. As orientações destacadas apresentam o menor consumo de energia para uma dada relação  $V_{ar}/A_{col}$  e as demais variam em sua função. Observa-se que sistemas que utilizam menores relações  $V_{ar}/A_{col}$  estão sujeitos a maior influência da orientação adotada. Em outras palavras, quanto maior for a relação  $V_{ar}/A_{col}$ , menor será a sensibilidade do SAS a variações na orientação do coletor solar.

Isso ocorre porque as perdas de calor no coletor solar e no tanque de armazenamento diminuem com a redução no ganho de energia do sistema (maior relação  $V_{ar}/A_{col}$ ), conforme pode ser observado nas Figuras 16 a 18.

Figura 16 – Perdas de energia no tanque de armazenamento em São Paulo.

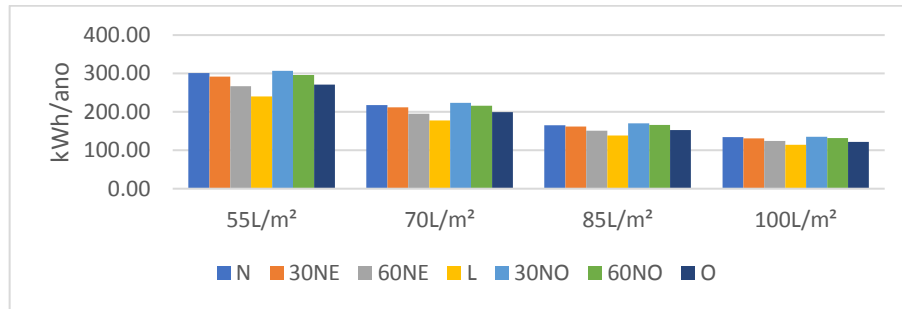


Figura 17 – Perdas de energia no tanque de armazenamento em Belém.

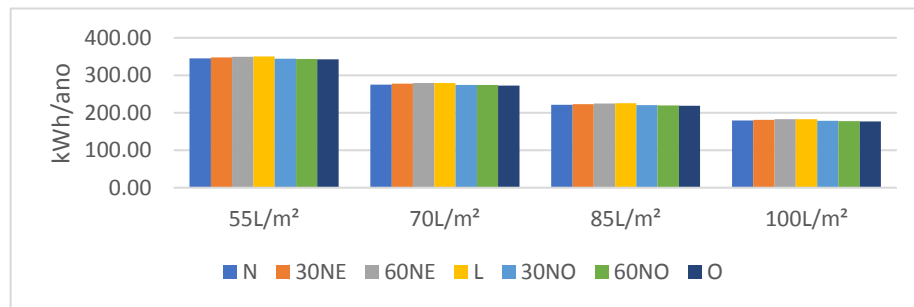
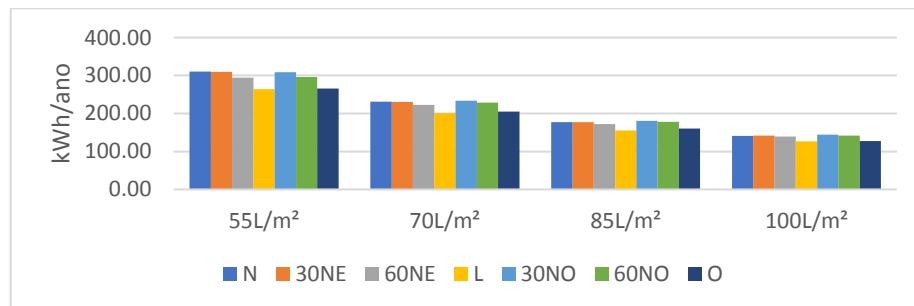


Figura 18 – Perdas de energia no tanque de armazenamento em Porto Alegre.

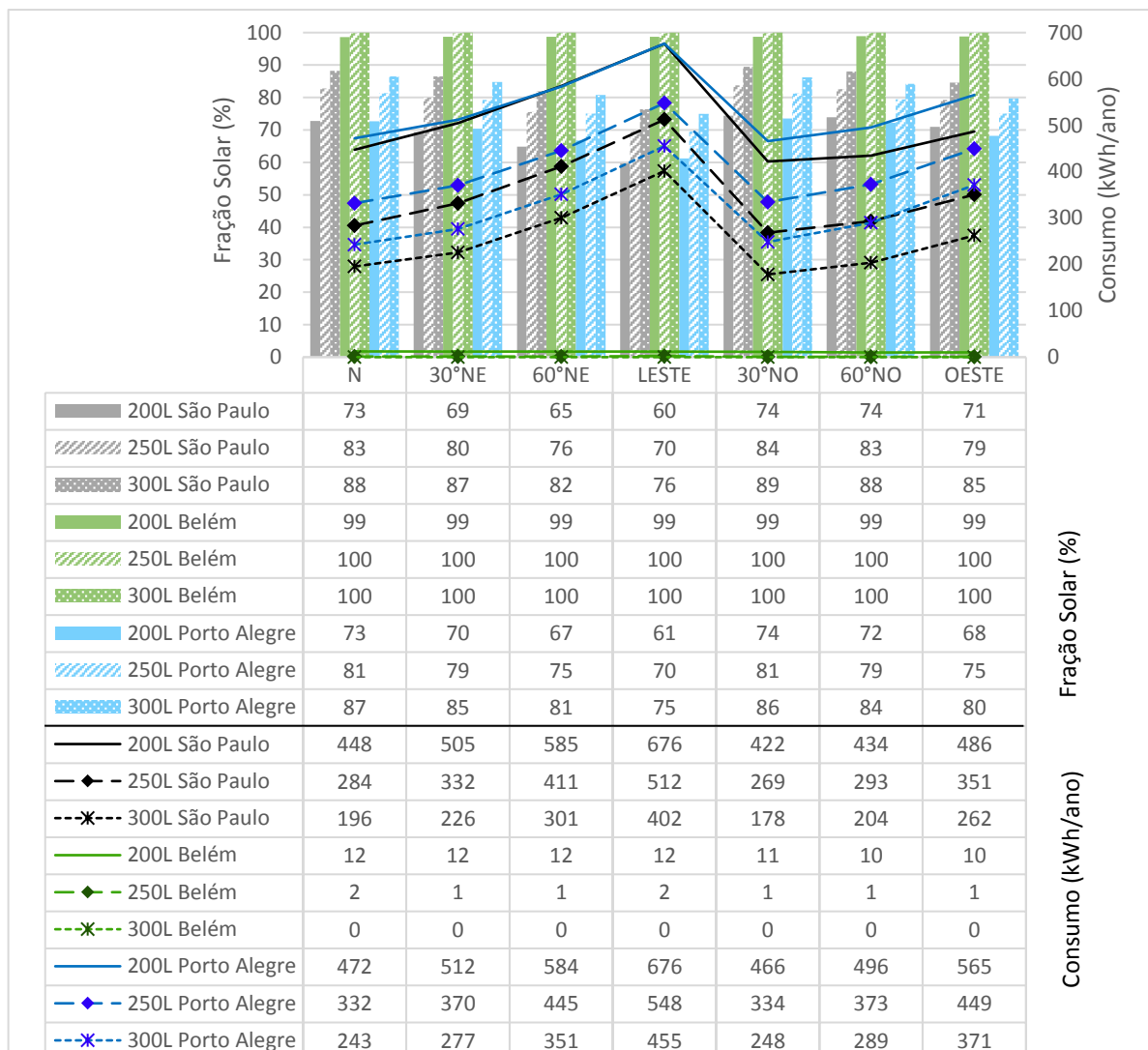


Na Figura 19 o volume de armazenamento é confrontado com as limitações de orientação dos coletores. Como já era esperado em sistemas de circulação natural em que ocorre a estratificação da água no tanque de armazenamento, tanques com maior volume tendem a proporcionar melhor desempenho ao SAS.

Em São Paulo e Porto Alegre, para os três volumes de armazenamento, as orientações mais promissoras são a Norte e 30°NO. Nos sistemas com tanques de volume 200L a fração solar do sistema atinge valor inferior a 70% quando o coletor fica limitado às orientações a 30° NE, 60°NE e Leste em São Paulo e a 60°NE, Leste

e Oeste em Porto Alegre. Para estas duas cidades o uso de tanques de 250L, em quaisquer orientações, resulta em fração solar igual ou superior a 70% enquanto que em configurações com volume de 300L, este valor é superior a 75%. Em Belém a fração solar do sistema com o uso de tanques de 200L atinge valores elevados (99%) para todas as orientações de coletores solares. Tanques com 250L elevam este percentual a 100%, e consumo de energia quase nulo em todos os cenários de orientação dos coletores.

Figura 19 – Impacto do volume de armazenamento na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.



O incremento no volume de armazenamento permite contornar os efeitos das orientações sobre o desempenho do sistema reduzindo o consumo de energia. Em uma comparação com o volume de armazenamento mais convencional (200L), a

economia pode chegar a 174kWh/ano quando substituído por um tanque de 250L e 284kWh/ano quando substituído por um tanque de 300L em São Paulo. Em Porto Alegre a economia a partir da alteração do volume de armazenamento pode alcançar 142kWh/ano (tanque de 250L) e 235kWh/ano (tanque de 300L). No estudo de Vieira *et al.* (2016), a análise realizada na cidade de Sydney<sup>14</sup>, Austrália, indicou uma redução na intensidade de energia demandada pelo sistema de aquecimento solar de água a partir da alteração no volume de armazenamento. O SAS neste estudo, com consumo diário igual 100L por habitação, apresentou uma redução de 10,3% (2,2kWh/m<sup>3</sup>) na intensidade energética com o aumento no volume armazenado de 160 para 330L. Isso representa uma redução anual de aproximadamente 80kWh/ano.

Na Tabela 15 são apresentadas as reduções percentuais no consumo de energia em função da substituição dos tanques de 200L. Em Belém, estas reduções são maiores pois em termos absolutos o consumo de energia é muito pequeno nos casos em que o volume armazenado foi de 200L. Dessa forma o incremento no volume armazenado resulta em um consumo próximo a zero. Em São Paulo, a redução máxima no consumo de energia é de 37% e 58% mediante a substituição do volume convencional de 200L por volumes de armazenamento de 250L e 300L, respectivamente. Em Porto Alegre esses valores máximos de economia de energia alcançam 30% e 49% respectivamente.

Tabela 15 – Redução percentual no consumo de energia em função do volume de armazenamento de 200L.

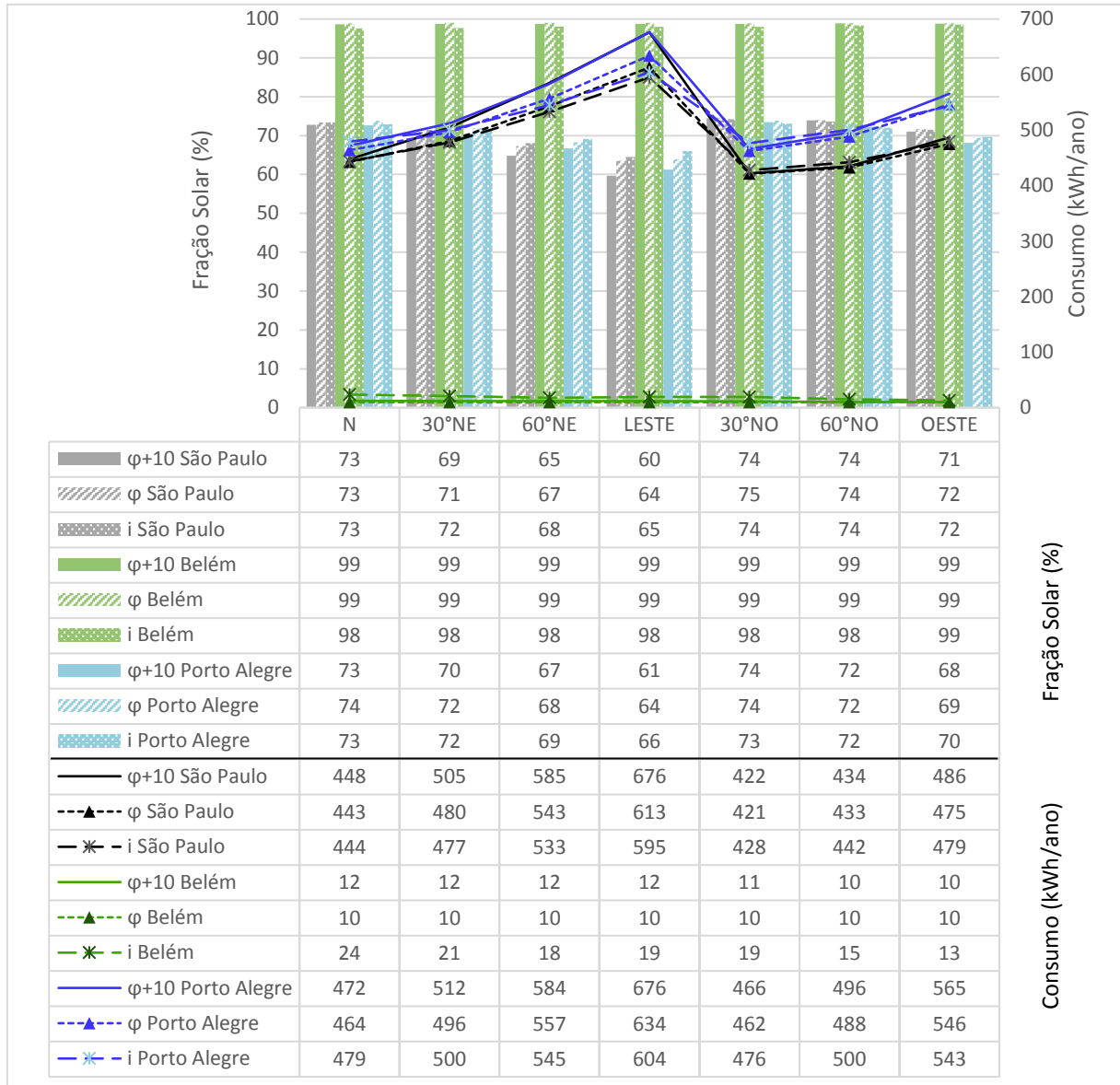
		N	30°NE	60°NE	LESTE	30°NO	60°NO	OESTE
<b>São Paulo</b>	250L	37%	34%	30%	24%	36%	33%	28%
	300L	56%	55%	49%	41%	58%	53%	46%
<b>Belém</b>	250L	87%	88%	92%	81%	92%	93%	91%
	300L	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<b>Porto Alegre</b>	250L	30%	28%	24%	19%	28%	25%	21%
	300L	49%	46%	40%	33%	47%	42%	34%

Na Figura 20 o desempenho do SAS em condições limitadas de orientação do coletor solar é avaliado em função de variações na inclinação do coletor. Observando a fração solar do sistema das três cidades percebe-se que não há grande amplitude entre as três inclinações para todos os cenários de orientação do coletor. Para São Paulo e Porto Alegre, as orientações a 30°NO e Norte, assim como nas

<sup>14</sup> Sydney apresenta latitude similar a cidade de Porto Alegre: 33,86° Sul.

análises anteriores, proporcionaram menor consumo anual de energia enquanto que as orientações a 60°NE e Leste, maior consumo energético.

Figura 20 - Impacto da inclinação do coletor na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.



Em São Paulo e Porto Alegre, embora para a maioria das orientações as três inclinações propostas resultem em consumo de energia semelhante, o uso de coletores inclinados a  $i=\phi+10^\circ$  se mostrou menos favorável para a maioria das configurações de orientação, especialmente para as duas mais críticas: a 60°NE e Leste. Nestas orientações, a adoção da inclinação  $i=\phi+10^\circ$  resultou em uma fração solar anual de 3 a 5% menor que  $i=20^\circ$  em São Paulo, e de 2 a 5% menor que  $i=20^\circ$

em Porto Alegre. Em termos de consumo de energia essas diferenças variam em até 81kWh/ano em São Paulo, e até 72kWh/ano em Porto Alegre, a depender da orientação. É importante ressaltar que é recomendável o uso de maiores inclinações pois normalmente estas favorecem o menor consumo de energia durante o inverno, período em que o SAS é mais solicitado, como pode ser observado nas Tabelas 16, 17 e 18. Somente as orientações mais críticas (60NE e Leste) constituem exceções, em virtude da trajetória aparente do sol e o ângulo de incidência da radiação solar.

Tabela 16 – Consumo médio de energia (kWh) durante os meses de inverno em São Paulo.

	$\varphi+10$	$\Phi$	i
<b>NORTE</b>	48.82	51.66	52.76
<b>30NE</b>	56.28	56.97	57.50
<b>60NE</b>	68.81	66.34	65.97
<b>LESTE</b>	83.01	77.47	75.85
<b>30NO</b>	47.59	50.27	51.77
<b>60NO</b>	51.92	53.59	55.37
<b>OESTE</b>	61.41	61.23	62.12

Tabela 17 – Consumo médio de energia (kWh) durante os meses de inverno em Belém.

	$\varphi+10$	$\Phi$	i
<b>NORTE</b>	0.94	1.16	0.98
<b>30NE</b>	1.01	1.18	1.06
<b>60NE</b>	1.19	1.19	1.35
<b>LESTE</b>	1.43	1.22	0.94
<b>30NO</b>	0.93	1.17	0.94
<b>60NO</b>	1.01	1.17	1.07
<b>OESTE</b>	1.21	1.20	1.36

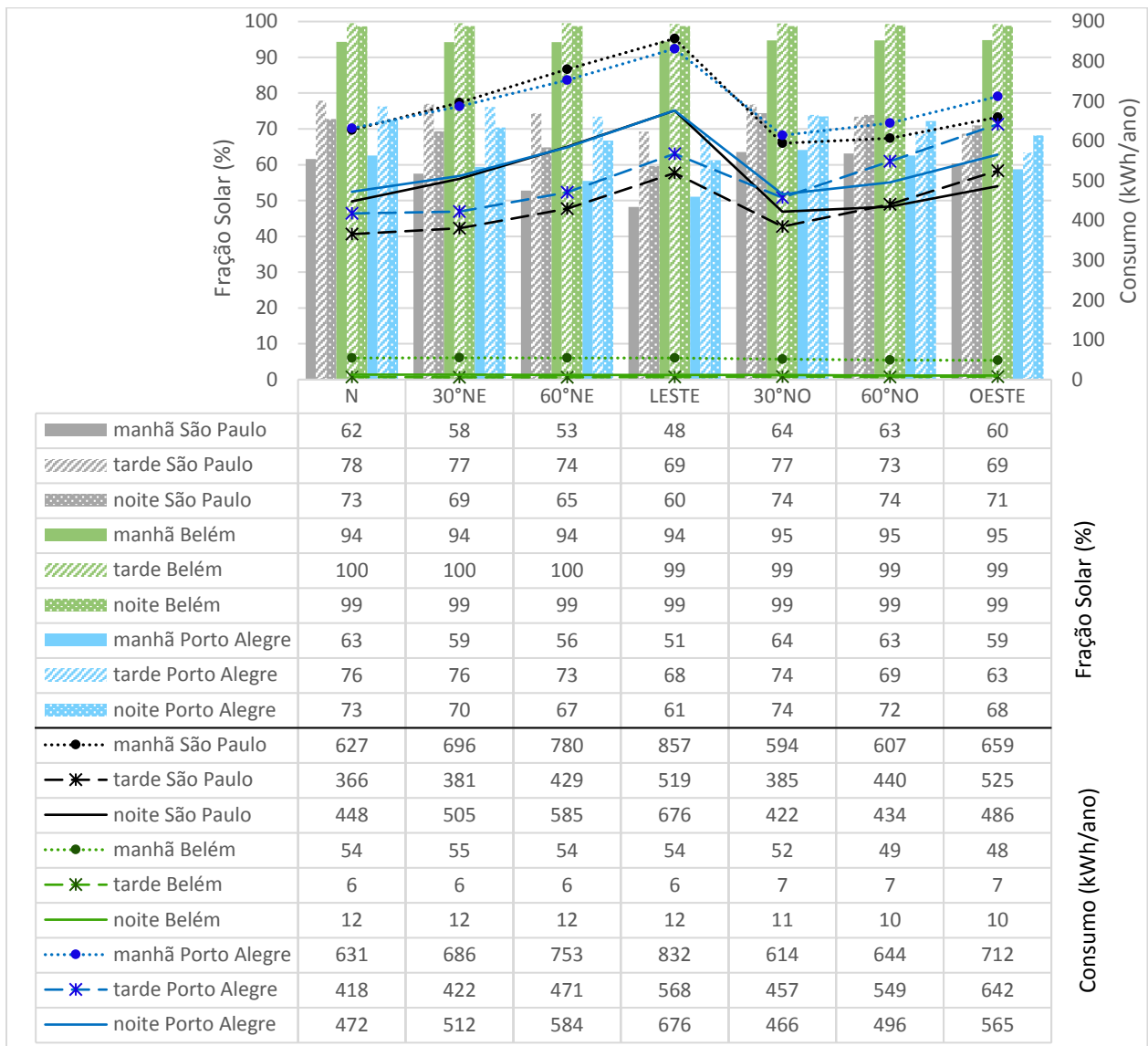
Tabela 18 – Consumo médio de energia (kWh) durante os meses de inverno em Porto Alegre.

	$\varphi+10$	$\Phi$	i
<b>NORTE</b>	70.51	71.52	74.98
<b>30NE</b>	76.06	75.97	77.92
<b>60NE</b>	86.89	84.92	84.52
<b>LESTE</b>	99.59	96.09	93.22
<b>30NO</b>	71.32	72.13	75.08
<b>60NO</b>	76.68	76.68	79.13
<b>OESTE</b>	87.05	85.25	85.49

Em Belém, as configurações com inclinação igual a latitude local ( $\varphi=1^\circ$ ) e  $\varphi+10^\circ$  consomem menos energia para as sete configurações de orientação do coletor. Devido à proximidade com a linha do Equador, quanto mais próxima do plano horizontal for a inclinação mais energia o sistema tende a captar. Desse modo, nos casos em que os coletores possuem inclinação coincidente à cobertura, o consumo de energia é aumentado em até 140% em relação à inclinação coincidente a latitude local. Mesmo nestes casos, com o crescimento no consumo de energia em SAS com coletores repousando sobre a cobertura, a fração solar do sistema se mantém superior a 98%. Foi observado que, embora o consumo energético não varie significativamente entre as sete configurações de orientação, sistemas com coletores orientados a  $60^\circ\text{NO}$  e Oeste apresentam desempenho discretamente superior às demais orientações, especialmente quando a inclinação se iguala a da cobertura ( $i=20^\circ$ ). Presume-se que a orientação Norte apresentou o pior desempenho, para esta configuração de inclinação, por conta da redução do ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície do coletor.

Na Figura 21 o desempenho do sistema de aquecimento solar foi simulado mediante variações no horário de banho dos usuários, conforme descrito na Tabela 8. Nas três cidades, sistemas com banhos programados durante a manhã apresentaram os piores índices de desempenho. Em Belém os melhores índices de desempenho foram alcançados quando os banhos ocorreram durante a tarde, em quaisquer orientações adotadas para o coletor. Em São Paulo e Porto Alegre, banhos vespertinos resultaram em menor consumo de energia para a maioria das orientações, a exceção dos casos com coletores orientados a  $60^\circ\text{NO}$  e Oeste em que banhos programados durante a noite propiciam melhor desempenho do sistema. Nestas duas cidades a fração solar do sistema é inferior a 70% quando os usuários optam por banhos durante a manhã. Alterações no hábito de banho podem promover um aumento de até 21% na fração solar do sistema em São Paulo, até 6% em Belém, e até 17% em Porto Alegre. Isto representa uma redução no consumo anual de energia de 338 kWh, 49kWh e 282kWh em São Paulo, Belém e Porto Alegre, respectivamente.

Figura 21 - Impacto do horário de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.



A Tabela 19 apresenta o incremento no consumo de energia em função do melhor horário de banho, o qual encontra-se destacado. Pode-se observar que as orientações a 60°NO e Oeste apresentam menor variação no consumo entre os horários de banho, variando entre 1 e 40% em São Paulo, e entre 11 e 30% em Porto Alegre. SAS com coletores orientados a 30°NE, 60°NE e Leste são mais sensíveis aos hábitos dos usuários, variando o consumo entre 30 e 83% em São Paulo, e entre 19 e 63% em Porto Alegre.

Em Belém, SAS configurados com banhos durante as manhãs apresentaram fração solar igual ou superior a 94%, de acordo com a Figura 21, entretanto nestes casos o consumo de energia pode ser quase 900% superior ao

consumo de usuários com padrão de banho durante a tarde. Em termos absolutos a diferença entre os dois horários de banho foi de quase 50kWh/ano, valor significativo para os padrões de consumo desta cidade.

Em São Paulo, hábitos de banho vespertino apresentaram menor consumo de energia para a maioria das orientações. Sistemas configurados para que os banhos ocorram durante a noite apresentam consumo até 36% superior à configuração vespertina (60°NE). Já os usuários com hábitos de banho durante a manhã consomem até 83% mais energia que aqueles que optam por banhos vespertinos.

Em Porto Alegre, usuários com hábito de banho matinal podem consumir entre 26 e 63% mais energia que os usuários com hábito vespertino. Nos casos em que os banhos ocorrem à noite ou durante a tarde, o aumento no consumo de energia é mais discreto quando comparados ao cenário mais promissor.

Tabela 19 – Aumento no consumo de energia em função do melhor horário de banho.

		N	30°NE	60°NE	LESTE	30°NO	60°NO	OESTE
São Paulo	manhã	72%	83%	82%	65%	54%	40%	36%
	tarde	0%	0%	0%	0%	0%	1%	8%
	noite	22%	33%	36%	30%	10%	0%	0%
Belém	manhã	748%	865%	849%	778%	652%	619%	562%
	tarde	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	noite	92%	112%	108%	94%	66%	50%	40%
Porto Alegre	manhã	51%	63%	60%	47%	34%	30%	26%
	tarde	0%	0%	0%	0%	0%	11%	13%
	noite	13%	21%	24%	19%	2%	0%	0%

Na pesquisa de Sangoi (2015), pode-se inferir a partir dos dados apresentados<sup>15</sup> que usuários com hábito de banho matinal consomem em média 43 e 79% mais energia que os usuários com preferência por banhos noturnos, em São Paulo e Belém respectivamente. Estes resultados são análogos com a presente pesquisa que igualmente aponta para um maior consumo quando os banhos ocorrem no período da manhã em São Paulo (39%) e Belém (78%).

Embora a revisão de literatura tenha indicado que o melhor desempenho de sistemas estratificados é obtido quando o usuário prioriza os banhos durante a noite, os resultados da simulação indicaram que quanto mais próximos os períodos

<sup>15</sup> Inferiu-se a partir da análise das figuras 23 e 26 do trabalho de Sangoi (2015).

de banho com o horário de maior ganho de energia pelos coletores, maior o desempenho do sistema. Por conta disso os sistemas com coletores voltados a 60°NO e Oeste obtiveram melhor desempenho para banhos noturnos, pois nestas orientações o ganho de energia é maior no fim da tarde.

A Figura 22 apresenta o desempenho de SAS analisado sob a ótica do nível de conforto de banho dos usuários. Nesta análise houve a necessidade de aumentar o volume de armazenamento para 250L quando a vazão de banho foi estabelecida em 6L/min, e 300L quando esta foi fixada em 8L/min, a fim de obedecer ao volume mínimo de armazenamento estabelecido pela NBR 15569. Do mesmo modo, a área coletora foi incrementada com o objetivo de manter a mesma relação  $V_{ol}/A_{col}$  estabelecida na condição de referência (100L/m<sup>2</sup>). Nas três cidades analisadas, embora a demanda por água quente aumente com o crescimento do nível de conforto de banho, a fração solar do sistema entre os três níveis se mantém aproximada para todas as orientações limitadas ao coletor solar. Entretanto, o consumo de energia pelo *backup* também cresce uma vez que a demanda por água quente é maior.

Observa-se que em São Paulo e Porto Alegre a fração solar do sistema aumenta com o incremento no nível de conforto, mas em Belém ocorre o inverso. O crescimento da fração solar nas duas primeiras cidades pode ser justificado pelo aumento no volume de armazenamento que, na análise anterior, se mostrou mais relevante nestas cidades para a melhoria do desempenho do sistema.

Em Belém, embora a variação no consumo de energia entre as sete orientações tenha sido discreta, para um mesmo nível de conforto, coletores orientados a 60°NO e Oeste proporcionam melhor desempenho ao sistema, enquanto que coletores voltados a Norte e 30°NE resultaram no pior desempenho.

Mais uma vez percebe-se que as orientações a 30°NE, 60°NE e Leste proporcionam os maiores consumos de energia em São Paulo e Porto Alegre. Em algumas situações é possível elevar o nível de conforto do banho mediante alterações na orientação do coletor sem implicar em aumento no consumo de energia.

De acordo com a Tabela 20, em São Paulo a melhoria no nível de conforto de banho de 4L/min para 6L/min ou 8L/min elevou o consumo de energia em até 52 e 91%, respectivamente. Em Porto Alegre o crescimento máximo é de 46% alterando-se para o nível de conforto 6L/min e 72% para o nível de conforto 8L/min. Para Belém, dependendo da orientação adotada, o incremento no nível de conforto

para 6L/min ou 8L/min elevou em até 228 e 471% o consumo de energia, respectivamente. No entanto em todos os cenários a fração solar do sistema permanece superior a 96%.

Figura 22 - Impacto do nível de conforto de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.



Tabela 20 – Crescimento no consumo de energia em função do incremento no nível de conforto de banho.

		N	30°NE	60°NE	LESTE	30°NO	60°NO	OESTE
<b>São Paulo</b>	6L/min	43%	47%	46%	44%	49%	52%	52%
	8L/min	91%	82%	76%	69%	88%	88%	84%
<b>Belém</b>	6L/min	228%	216%	160%	138%	191%	136%	114%
	8L/min	454%	458%	446%	422%	458%	471%	462%
<b>Porto Alegre</b>	6L/min	46%	44%	41%	37%	46%	45%	46%
	8L/min	72%	68%	61%	53%	70%	67%	62%

A Figura 23 e a Tabela 21 apresentam os impactos nos indicadores de desempenho em dois cenários de localização do tanque de armazenamento na cobertura: dentro ou fora do ático. Em São Paulo e Porto Alegre o posicionamento dos tanques dentro do ático incrementa a fração solar em até 3%. A medida permite economizar de 8 a 10% de energia em São Paulo, representando uma economia de até 52kWh/ano, e de 4 a 6% em Porto Alegre, economizando até 34kWh/ano, dependendo da orientação da área coletora. Em Belém, assim como foi observado nas análises anteriores, os SAS atenderam quase a totalidade da demanda por aquecimento (fração solar igual a 99%), com consumo de energia aproximado entre as orientações. Não houve alterações significativas, em termos absolutos, na redução do consumo energético mediante a mudança na localização do tanque de armazenamento, embora sistemas com tanques alocados no ático consumam de 38 a 42% menos energia que aqueles com reservatório fora do ático.

Figura 23 – Impacto da localização do tanque de armazenamento na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.

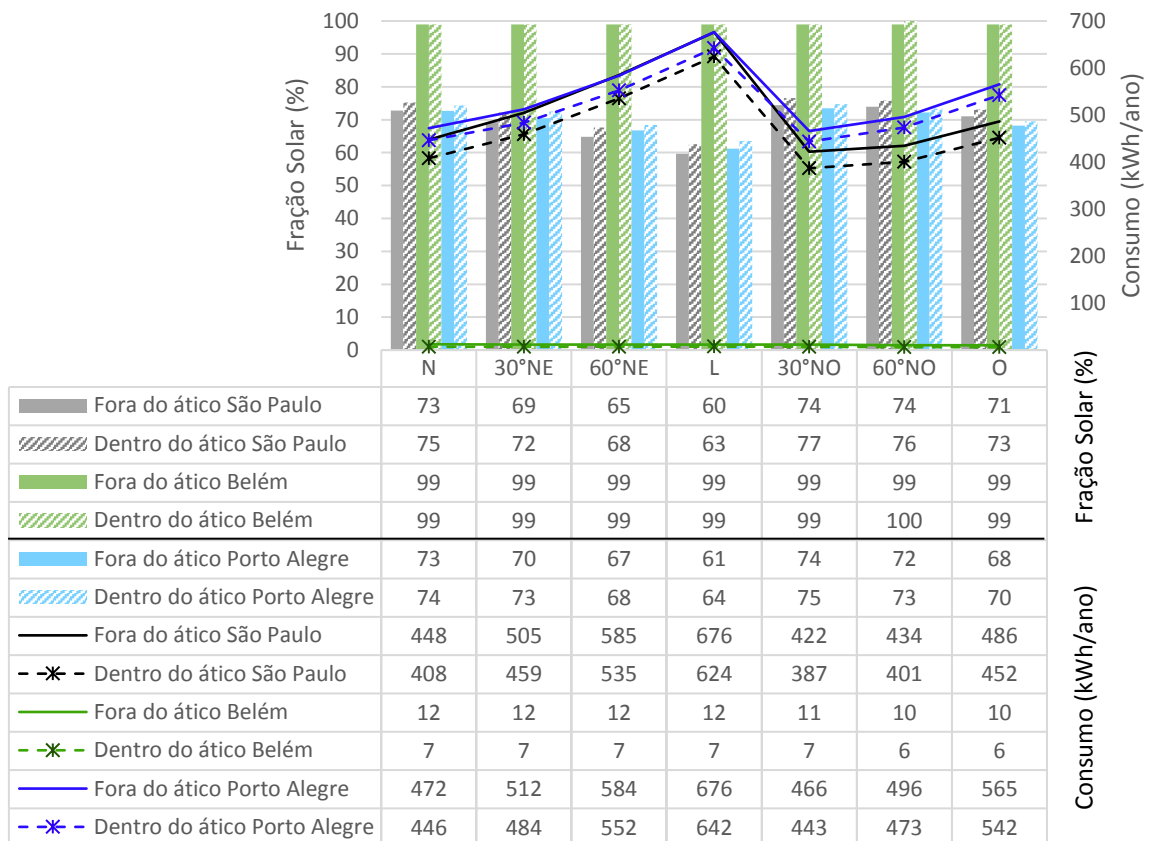


Tabela 21 – Economia de energia em SAS pela relocação do tanque de armazenamento abrigado dentro do ático.

		N	30°NE	60°NE	L	30°NO	60°NO	O
<b>São Paulo</b>	Absoluto (kWh/ano)	39	46	50	52	35	34	34
	Relativo (%)	10%	10%	9%	8%	9%	8%	8%
<b>Belém</b>	Absoluto (kWh/ano)	5	5	5	5	5	4	4
	Relativo (%)	42%	41%	39%	38%	41%	39%	39%
<b>Porto Alegre</b>	Absoluto (kWh/ano)	26	28	31	34	22	22	23
	Relativo (%)	6%	6%	6%	5%	5%	5%	4%

Os resultados de economia foram menores que o esperado, sendo mais significativos para as piores orientações. O parâmetro 'localização do tanque' enquanto condição limitante ainda será apresentado nas análises a seguir.

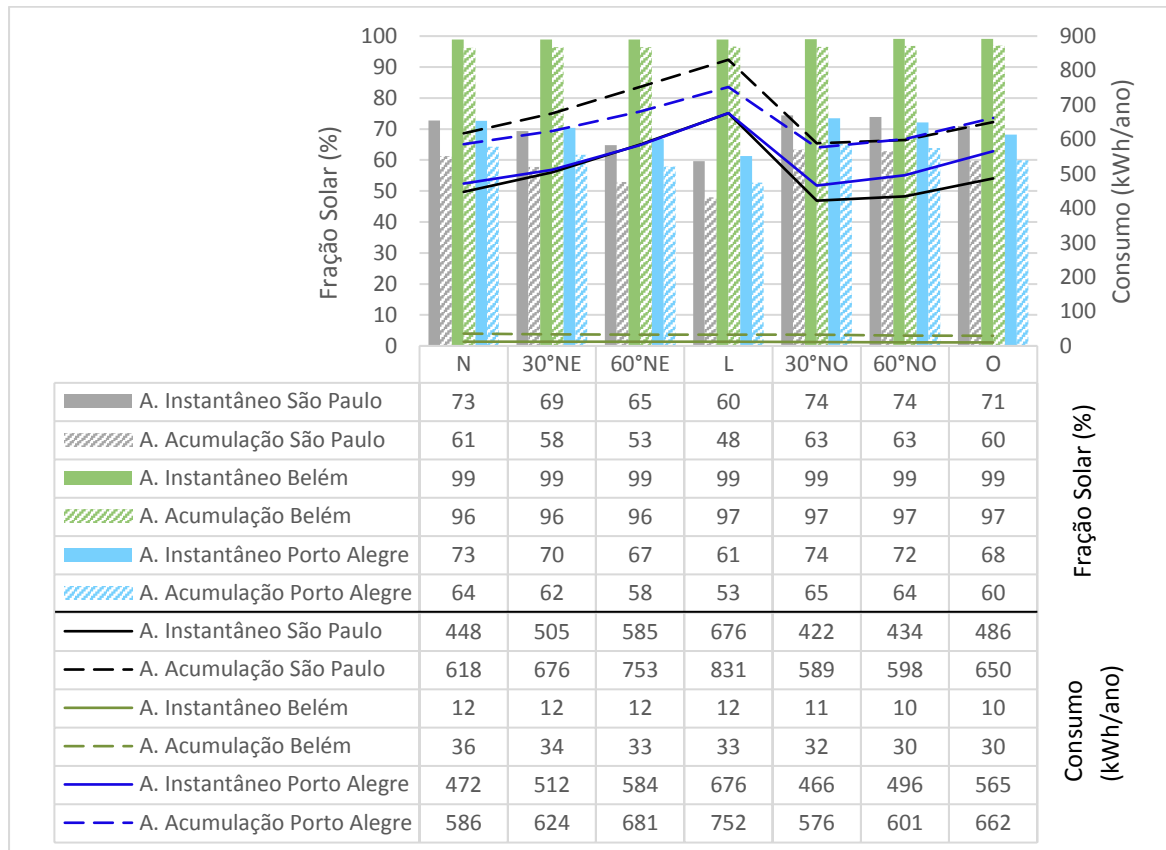
A Figura 24 apresenta a influência do tipo de *backup* sobre o desempenho do sistema em função de limitações na orientação dos coletores. Esse parâmetro foi variado entre o uso de um aquecedor instantâneo (chuveiro elétrico) ou de um aquecedor de acumulação (resistência elétrica instalada no interior do tanque de armazenamento). Em todas as orientações o desempenho de sistemas com aquecedor instantâneo foi melhor que o uso do aquecedor de acumulação. Isso é justificado pelo tempo de uso da resistência do aquecedor de acumulação, programada para ser acionada com 1 hora de antecedência do horário de banho, a fim de completar a energia para aquecer a água à temperatura de conforto de banho.

Em São Paulo e Porto Alegre nenhum dos cenários com *backup* aquecedor de acumulação obteve fração solar superior a 70%, embora em Belém a fração solar supere 96% nestes casos. O uso do aquecedor de acumulação em detrimento do aquecedor instantâneo reduz em até 12% a fração solar em São Paulo, 3% em Belém e 9% em Porto Alegre. As orientações a 30°NE e Leste favorecem o menor consumo de energia em São Paulo e Porto Alegre e, a 60°NO e Oeste, em Belém para qualquer *backup* adotado.

Observando a distribuição das linhas de consumo de energia, percebe-se que em São Paulo e Porto Alegre, o uso do *backup* aquecedor instantâneo apresenta consumo de energia equivalente ao de SAS com aquecedor de acumulação com orientação distinta. É possível afirmar, por exemplo, que quando o coletor estiver limitado a Leste, um SAS com aquecedor instantâneo como *backup* consome mais

energia que aqueles com aquecedor de acumulação limitados a Norte, 30°NO, 60°NO e Oeste.

Figura 24 – Impacto do tipo de *backup* na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da orientação do coletor.



A Tabela 22 apresenta a diferença no consumo de energia com a substituição do *backup* do aquecedor instantâneo pelo de acumulação. SAS com *backup* aquecedor de acumulação chegam a consumir até 40% mais energia que SAS com aquecedor instantâneo em São Paulo, e 24% em Porto Alegre. Isto significa um aumento de até 171 kWh/ano em São Paulo, e até 114kWh/ano em Porto Alegre, dependendo da orientação. Em Belém embora o aumento no consumo mediante a substituição do *backup* seja de até 191%, a máxima diferença entre eles é de 24kWh/ano.

Tabela 22 – Incremento no consumo de energia pela substituição do Aquecedor Instantâneo pelo Aquecedor de Acumulação.

		N	30°NE	60°NE	L	30°NO	60°NO	O
São Paulo	Absoluto (kWh/ano)	170	171	168	155	167	164	164
	Relativo (%)	38%	34%	29%	23%	40%	38%	34%

<b>Belém</b>	Absoluto (kWh/ano)	24	22	21	21	21	20	19
	Relativo (%)	191%	181%	178%	173%	185%	194%	190%
<b>Porto Alegre</b>	Absoluto (kWh/ano)	114	112	98	76	110	105	97
	Relativo (%)	24%	22%	17%	11%	24%	21%	17%

As Figuras 25 a 27 apresentam o Coeficiente de Variação (CV) do consumo de energia, dado pelo quociente do desvio padrão pela média. Elas sintetizam o que foi observado nas análises anteriores, destacando as orientações mais sensíveis às variações dos parâmetros construtivos e de uso. Para as três cidades, os parâmetros construtivos Relação  $V_{ar}/A_{col}$  e Volume do tanque apresentam maior influência nos indicadores de desempenho do SAS. Em São Paulo e Porto Alegre, SAS com coletores orientados a Leste e Oeste tendem a sofrer menos variações no consumo de energia mediante alterações dos parâmetros ( $CV < 0,3$ ). Isto não implica dizer que estas orientações proporcionam desempenho melhor ou pior ao SAS, apenas são menos suscetíveis a sofrerem alterações no indicador de desempenho mediante variações dos parâmetros estudados. Ainda nestas duas cidades, SAS orientados a Norte ou 30NO são os mais sensíveis às variações nos parâmetros.

Em Belém, a distribuição do Coeficiente de Variação é proporcional para as sete orientações em todos os parâmetros trabalhados. Isto indica que todas as orientações sofrerem os impactos nas variações destes parâmetros de forma semelhante.

Figura 25 - Coeficiente de Variação do consumo de energia por orientação em São Paulo.

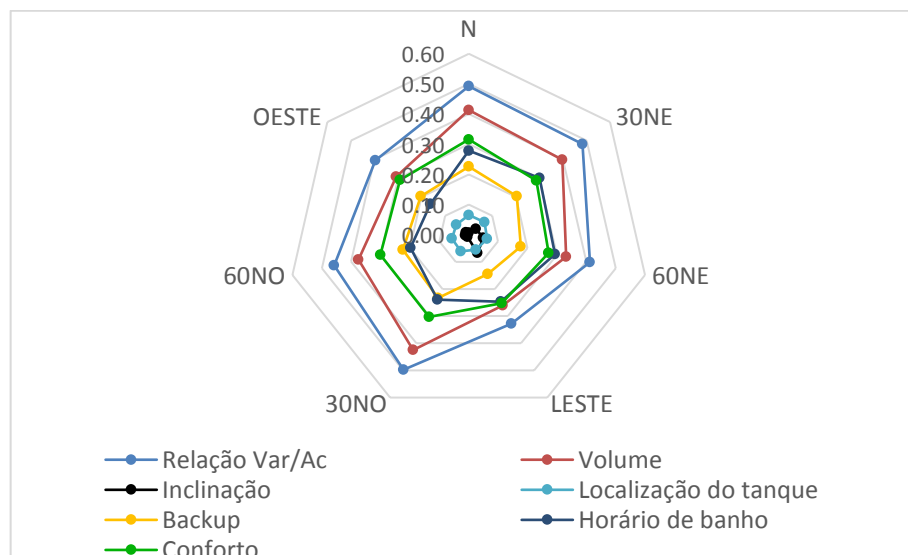


Figura 26 – Coeficiente de Variação do consumo de energia por orientação em Belém.

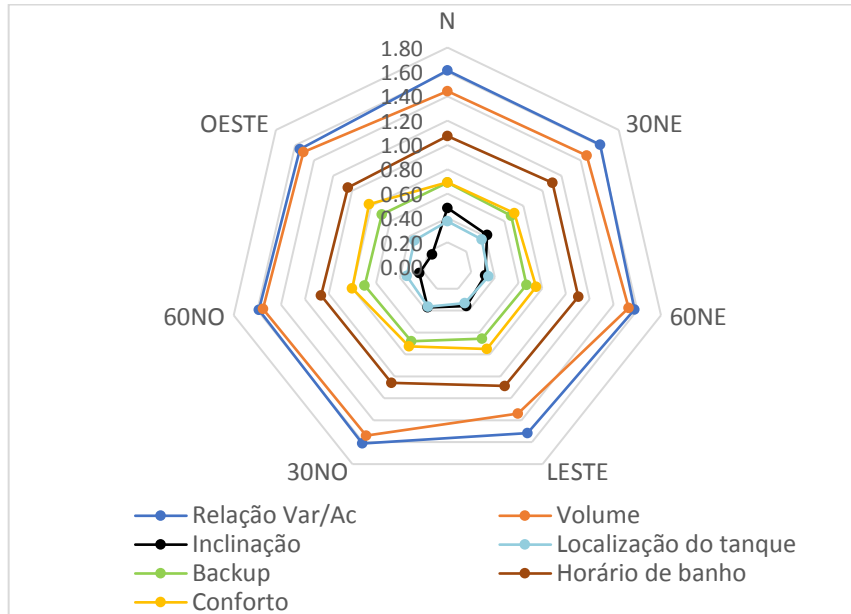
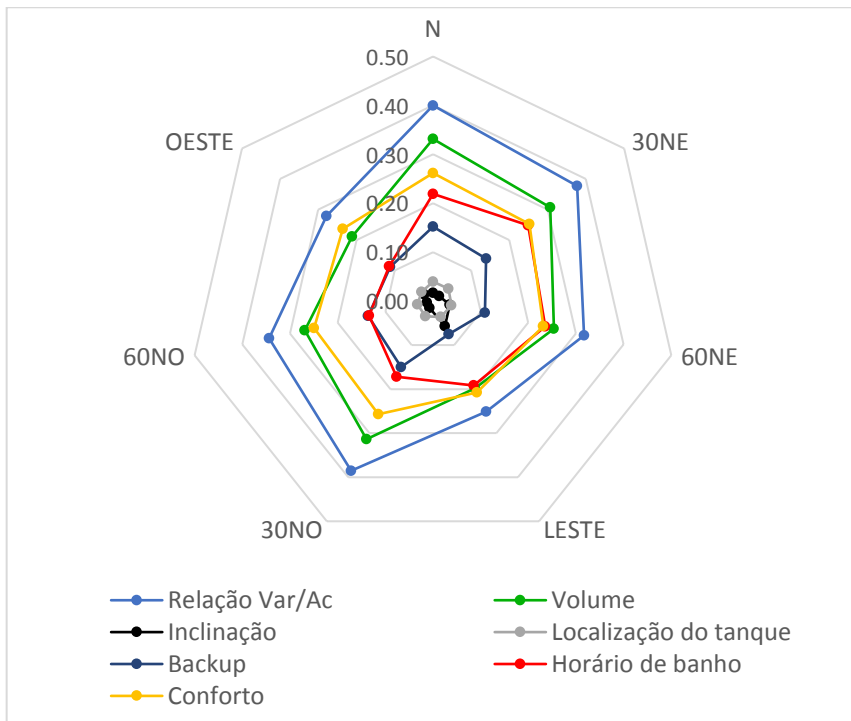


Figura 27 – Coeficiente de Variação do consumo de energia por orientação em Porto Alegre.



Em São Paulo e Porto Alegre, o Nível de Conforto do Banho é o parâmetro de uso que mais sensibiliza o desempenho do SAS na maioria das

orientações estudadas, enquanto que em Belém, os indicadores de desempenho são mais sensíveis ao horário de banho adotado pelo usuário.

As alterações propostas na condição de isolamento do circuito primário não resultaram em variações nos indicadores de desempenho em nenhuma das cidades.

#### **4.2.2 Limitação 02 – Inclinação dos coletores solares**

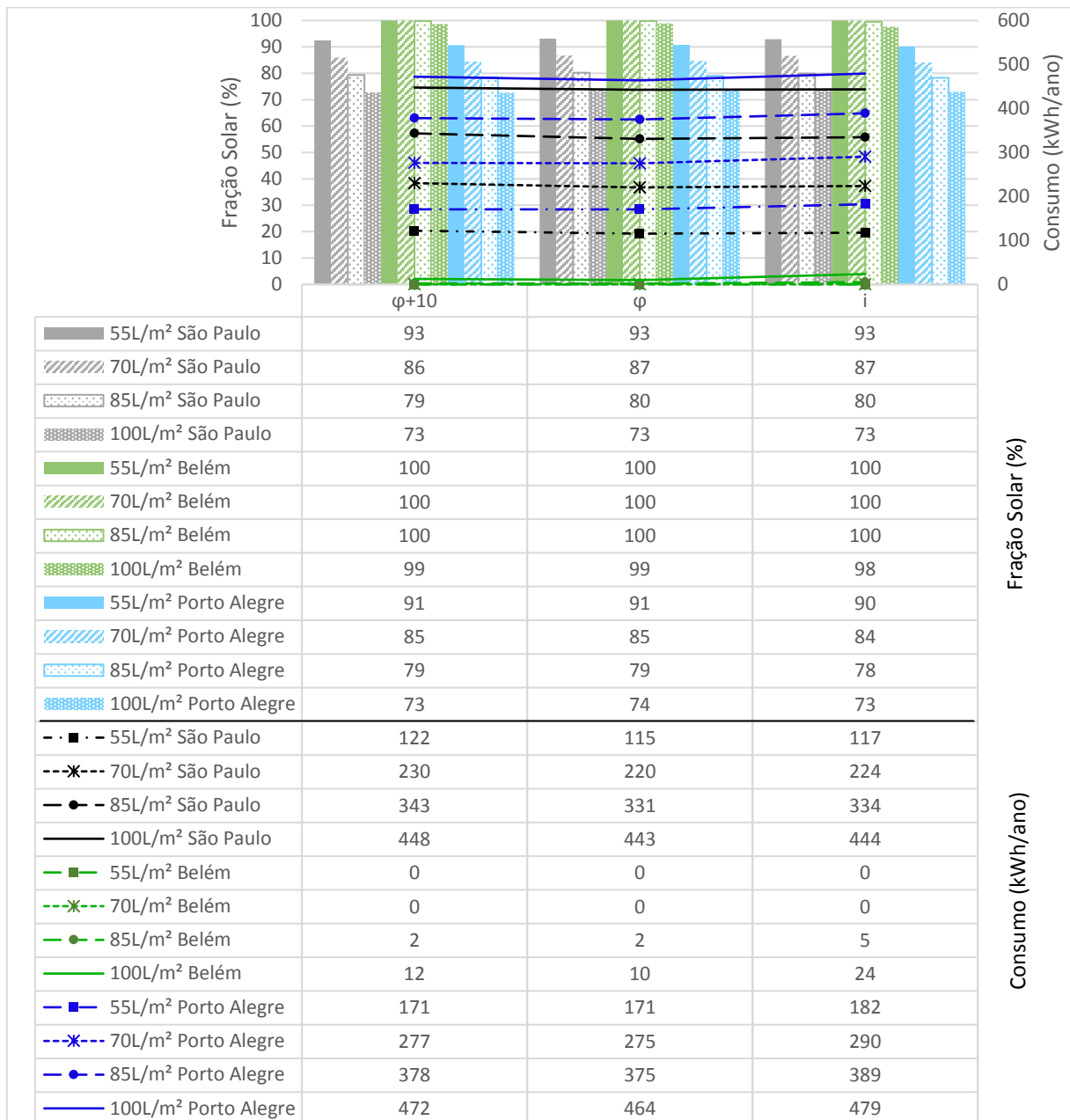
As análises da Figura 28, a seguir, e das Figuras 30 a 34 localizadas no Apêndice B, apresentam os impactos das variações de seis parâmetros nos indicadores de desempenho em função de limitações na inclinação do coletor solar, excluindo-se os casos abordados no tópico anterior.

Nas três cidades, os melhores resultados foram alcançados com coletores de inclinação  $i=\varphi$ , orientados para Norte, conforme a Figura 28. Entretanto, observou-se, para todos os parâmetros, que a fração solar e o consumo de energia anual oscilam pouco entre as três configurações de inclinação. Como foi mencionado anteriormente, devido a semelhança de desempenho entre as três inclinações em São Paulo e Porto Alegre, cidades com estações bem definidas ao longo do ano, é indicado o uso de coletores com maior inclinação ( $i=\varphi+10^\circ$ ) por apresentarem melhor desempenho durante o inverno, conforme pode ser visto nas Tabelas 16, 17 e 18

Observando a Figura 28, na cidade de Belém percebe-se o oposto: devido a trajetória aparente do sol nesta região, menores inclinações ( $i=\varphi$ ) favorecem o maior aproveitamento da energia solar reduzindo em mais da metade o consumo anual, quando comparado a coletores apoiados diretamente sobre a cobertura ( $i=20^\circ$ ). Entretanto, para  $i=\varphi$ , o consumo de energia durante os meses de inverno é mais alto (Tabela 17).

Ao contrário da primeira condição limitante, a variação na relação  $V_{ar}/A_{col}$  não sensibilizou significativamente os indicadores de desempenho para em condições de limitação da inclinação do coletor solar, como percebe-se na Figura 28.

Figura 28 – Impacto da relação  $V_{ar}/A_{col}$  na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.



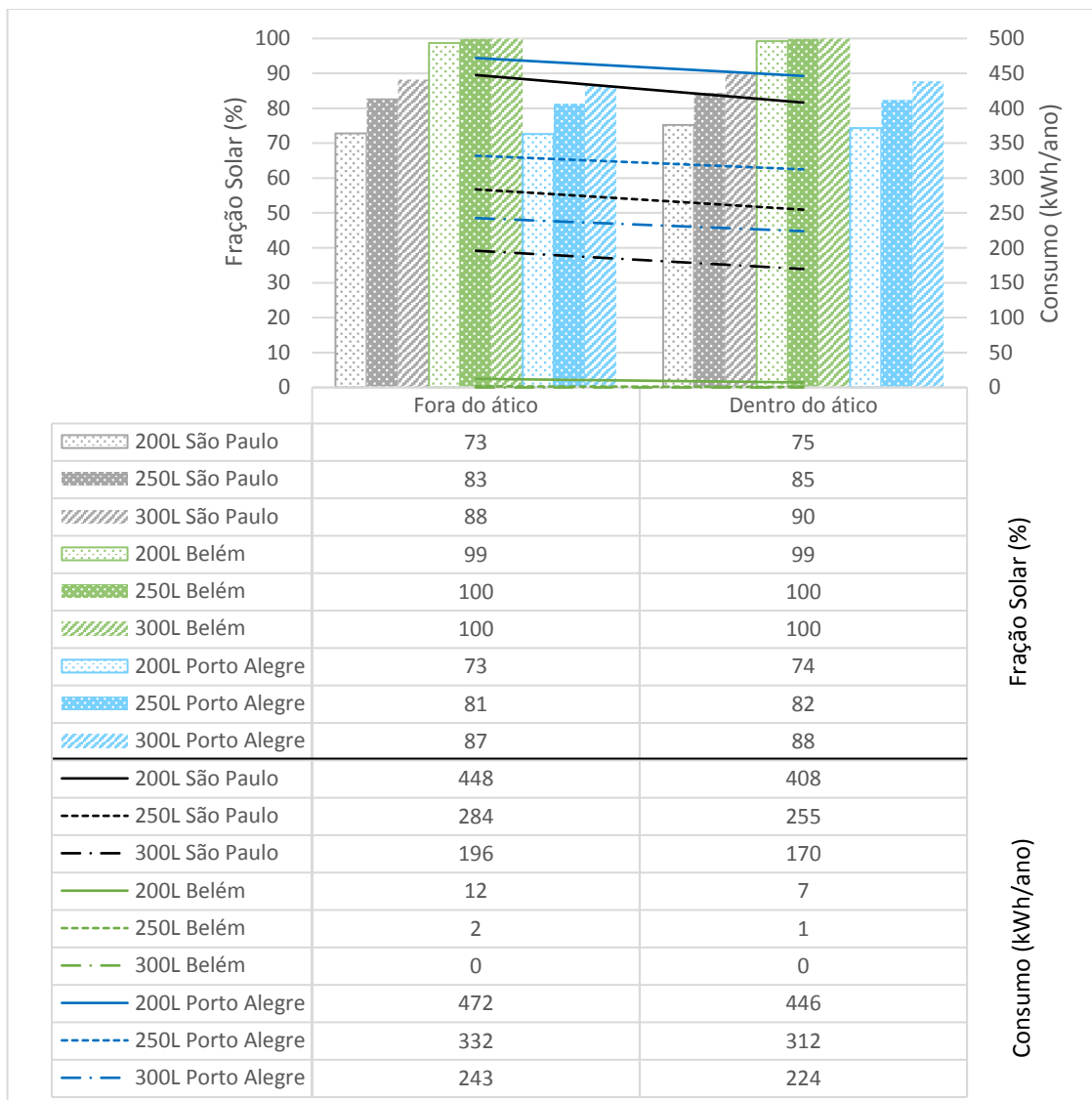
O mesmo se aplica para o volume de armazenamento do coletor, Figura 30; horário de banho, Figura 31; nível de conforto de banho, Figura 32; localização do tanque de armazenamento, Figura 33; e do tipo de *backup*, Figura 34, que se encontram no apêndice B.

Mais uma vez a condição de isolamento do circuito primário não resultou em variações nos indicadores de desempenho.

#### 4.2.3 Limitação 03 – Localização do tanque de armazenamento

A Figura 29, a seguir, e as Figuras 35 a 38, localizadas no Apêndice C, apresentam os impactos nos indicadores de desempenho para as demais configurações em função de limitações da localização do tanque de armazenamento.

Figura 29 – Impacto do volume do tanque na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento.



Percebe-se em todas as análises que o impacto da localização do tanque de armazenamento nos indicadores de desempenho é similar com a variação dos oito parâmetros nas três cidades. O volume de armazenamento é aquele que mais se destaca nesta condição de limitação. De acordo com a Figura 29 e a Tabela 23, SAS com reservatórios protegido no ático tendem a economizar mais energia quando

este apresenta o maior volume, 300L. Em São Paulo e Porto Alegre a máxima economia de energia é de 13 e 8%, respectivamente. Em Belém, embora a economia de energia em percentual seja elevada, em termos absolutos o valor é pouco significativo.

Tabela 23 – Redução no consumo de energia mediante relocação do tanque de armazenamento no ático.

200L	São Paulo	9%
250L	São Paulo	10%
300L	São Paulo	13%
200L	Belém	42%
250L	Belém	53%
300L	Belém	0%
200L	Porto Alegre	5%
250L	Porto Alegre	6%
300L	Porto Alegre	8%

Desse modo, observou-se que entre as três condições estudadas de limitação do Sistema de Aquecimento Solar, a orientação do coletor é a mais influente no seu desempenho energético, demandando ajustes nos parâmetros construtivos e operacionais para compensar configurações desfavoráveis de utilização. A detecção dos parâmetros mais influentes foi concebida para a partir de variações individuais dos mesmos, entretanto há um potencial ainda maior de melhoria da eficiência do sistema através da combinação das configurações mais promissoras.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou o impacto das diferentes características do ambiente construído e dos hábitos do usuário no desempenho de Sistemas de Aquecimento Solar de Água. O propósito foi conhecer o grau de influência destes parâmetros no desempenho final de SAS instalados em edificações que, em muitos casos, não foram planejadas para tal e oferecem algum tipo de limitação construtiva.

Baseado nas indicações da revisão bibliográfica e em considerações estabelecidas a partir de observações dos padrões de instalação destes sistemas em habitações de interesse social, foram propostas três condições limitantes na instalação do sistema e nove parâmetros, entre construtivos e de uso, a serem variados individualmente. A validação do modelo computacional utilizado para realizar as análises possibilitou maior credibilidade aos resultados obtidos.

A pesquisa constatou que, dentre as três condições de limitação propostas, a orientação dos coletores solares é a mais sensível a variações dos parâmetros construtivos e de uso e que, portanto, apresenta maior potencial de interferência na economia de energia do sistema. Em São Paulo e Porto Alegre, na maioria dos casos, a orientação 30° Noroeste proporcionou melhor desempenho ao sistema de aquecimento solar enquanto que a orientação a Leste resultou no pior desempenho. Em Belém, embora discreta a variação do desempenho entre as sete orientações estudadas, sistemas com coletores orientados a Oeste apresentaram menor consumo de energia que as demais orientações, a medida que a orientação Norte proporcionou o maior consumo, para a maioria dos casos analisados.

Através da variação da relação volume armazenado por área coletora ( $V_{ar}/A_{col}$ ), observou-se uma discrepância no desempenho de sistemas com orientações distintas quanto menor for a relação  $V_{ar}/A_{col}$ . Em contrapartida, SAS de relação convencional 100L/m<sup>2</sup>, utilizada em habitações de interesse social, os coletores orientados a Leste, por exemplo, apresentaram consumo de energia entre 45 e 60% superior a orientação mais promissora em Porto Alegre e São Paulo respectivamente. Em Belém, as variações deste parâmetro não afetaram significativamente o consumo de energia do sistema de aquecimento solar ao longo do ano.

O volume do tanque de armazenamento se mostrou relevante para aumentar a fração solar do sistema, especialmente em São Paulo e Porto Alegre.

Nestas cidades, o incremento no volume armazenado permitiu elevar a fração solar do sistema acima de 75% para todas as orientações estudadas. Isso possibilita compensar o desempenho de sistemas com orientações desfavoráveis a partir do aumento do volume armazenado. A depender da orientação adotada, a substituição do volume de armazenamento convencional de 200L por tanques de 250L ou 300L impactou significativamente no consumo energético resultando em uma economia que variou de 174 a 284kWh/ano em São Paulo, e 142 a 235kWh/ano em Porto Alegre. Em Belém, embora o consumo energético seja baixo para configurações convencionais do SAS, a substituição do volume armazenado por tanques de 250L reduziu o consumo de energia a quase zero.

O horário de banho dos usuários também se mostrou bastante relevante no desempenho final do sistema. De acordo com a pesquisa, nas três cidades o menor consumo de energia foi obtido predominantemente quando os usuários optaram por banhos vespertinos. Em São Paulo e Porto Alegre, banhos matinais resultaram em fração solar inferior a 65% para todas as orientações verificadas. As alterações no hábito de banho podem promover um aumento de até 21% na fração solar do sistema em São Paulo, até 6% em Belém, e até 17% em Porto Alegre. Os resultados indicaram que quanto mais próximo o horário de banho com o horário de maior ganho de energia pelos coletores, melhor será o desempenho do sistema.

O nível de conforto de banho foi variado em três configurações (4, 6 e 8L/min) seguindo-se a recomendação da NBR15569 para o volume armazenado. Observou-se que SAS com mesma orientação e diferentes níveis de conforto obtiveram fração solar semelhante, embora o consumo de energia pelo *backup* tenha aumentado em até 91% em São Paulo, 471% em Belém, e 72% em Porto Alegre, dependendo da configuração adotada.

Os *backups* instantâneo e de acumulação foram analisados a fim de avaliar as discrepâncias no desempenho final do sistema. Constatou-se que o consumo de energia do SAS com aquecedor de acumulação supera o SAS com aquecedor instantâneo em até 40% em São Paulo, 24% em Porto Alegre e 191% em Belém. Foi atribuído ao acionamento prévio da resistência a penalização do SAS com *backup* de acumulação.

O parâmetro condição de isolamento do circuito primário, variado em isolado e não isolado não resultou em alterações nos indicadores de desempenho em nenhuma das cidades, para as três condições de limitação avaliadas.

A inclinação do coletor também foi analisada enquanto condição limitante do sistema, porém não se mostrou muito sensível a variações dos demais parâmetros. Os resultados apontaram que em São Paulo e Porto Alegre SAS com coletores de inclinação  $i=\varphi+10^\circ$  apresentam fração solar anual 5% menor que em sistemas com coletores apoiados diretamente sobre a cobertura ( $i=20^\circ$ ). Entretanto, em uma análise por período do ano, a maior inclinação ( $i=\varphi+10^\circ$ ) favoreceu o menor consumo de energia durante o inverno, sendo mais vantajosa. Já em Belém, SAS com coletores apoiados diretamente sobre a cobertura consumiram 140% mais energia que os sistemas com inclinação coincidente a latitude local.

Por fim a localização do tanque de armazenamento, também analisada enquanto uma condição de limitação do ambiente construído apresentou maior sensibilidade a variação do parâmetro volume armazenado. Observou-se que a relocação do tanque de armazenamento para dentro do ático proporcionou uma redução no consumo de energia de até 8% em Porto Alegre, 13% em São Paulo e 53% em Belém e que reservatórios com maior volume tendem a apresentar melhores resultados de economia de energia.

De modo geral, nas três cidades, os parâmetros construtivos Relação  $V_{ar}/A_{col}$  e Volume do tanque apresentaram maior influência nos indicadores de desempenho do SAS. Entre os parâmetros operacionais, o Nível de Conforto do Banho mostrou-se o mais influente no desempenho do SAS em São Paulo e Porto Alegre, enquanto que em Belém, os indicadores de desempenho se mostraram mais sensíveis ao horário de banho adotado pelo usuário. Dessa forma, ajustes na configuração destes parâmetros, adequados às necessidades dos usuários, permitem compensar ou minimizar os efeitos das limitações construtivas avaliadas nesta pesquisa, aumentando a eficiência energética do Sistema de Aquecimento Solar de Água.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para continuação desta pesquisa sugere-se:

- Avaliar a sensibilidade do sistema às variações simultâneas dos parâmetros, a fim de determinar configurações ideais para as diferentes orientações do coletor solar;
- Adicionar outros parâmetros construtivos e de uso;
- Realizar esta análise para edificações multifamiliares.

## REFERÊNCIAS

ABDUNNABI, M. J. R.; ALAKDER, K. M. A.; ALKISHRIWI, N. A.; ABUGHRES, S. M. Experimental validation of forced circulation of solar water heating systems in TRNSYS. **Energy Procedia** 57, (2014) 2477-2486.

ALMANZA, R.; LENTZ, A.; JIMÉNEZ, G. Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs. **Solar Energy**, 61 (1997) 275–278.

ALTOÉ, L.; FILHO, D. O.; CARLO, J. C. Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. **Ambiente Construído**, 12 (2012) 75–87.

ALTOÉ, L.; FILHO, D. O.; CARLO, J. C.; MONTEIRO, P. M. B. Computer tools applied to analysis of solar water heaters. **Engenharia Agrícola**, 34 (2013) 1072–1078.

AMANCO. PREDIAL AMANCO PEX **Ficha Técnica**. Disponível em: <[http://assets.production.amanco.com.br.s3.amazonaws.com/uploads/asset/file/1545/Ficha\\_T\\_cnica\\_Linha\\_PEX.pdf](http://assets.production.amanco.com.br.s3.amazonaws.com/uploads/asset/file/1545/Ficha_T_cnica_Linha_PEX.pdf)>. Acesso em: 09 set. 2018.

ARIF, M. Life cycle analysis and carbon credit earned by solar water heating system. **International Journal of Research in Engineering and applied Sciences**, 2 (2012) 2249–3905.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15569: Sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação**. Rio de Janeiro, 2008.

BASKIN, E.; WNDT, R.; LENARDUZZI, R.; WOODBURY, K. A. Numerical evaluation of alternative residential hot water distribution systems. **ASHRAE Transactions, Technology Collection**, 110 (2004) 671–681.

BASTOS, H. M. C.; TORRES, P. J. G.; ÁLVAREZ, C. E. C. Numerical simulation and experimental validation of a solar-assisted heat pump system for heating residential water. **International Journal of refrigeration**, 86 (2018) 28-39.

BENGHANEM, M. Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. **Applied Energy**, 88 (2011) 1427–1433.

BLISS, R. W. The derivations of several “Plate efficiency factors” useful in the design of flat-plate solar heat collectors. **Solar Energy**, 3 (1959) 55– 64.

BOAIT, P. J.; DIXON, D.; FAN, D.; STAFFORD, A. Production efficiency of hot water for domestic use. **Energy and Buildings**, 54 (2012) 160-168.

BOJIĆ, M.; NIKOLIĆ, N.; NIKOLIĆ, D, SKERLIĆ, J.; MILETIĆ, I. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions. **Applied Energy**, 88 (2011) 2407–2419.

BRASIL, CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2017. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/acesso-a-informacao/Paginas/default.aspx>> Acesso em: 25 out. 2017.

BRASIL, CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Programa minha casa minha vida. **Termo de referência**. Sistemas de aquecimento solar de água – SAS. Disponível em: <[http://www.caixa.gov.br/Downloads/desenvolvimento-urbano-gestao-ambiental/TR\\_SAS\\_MCMV2.pdf](http://www.caixa.gov.br/Downloads/desenvolvimento-urbano-gestao-ambiental/TR_SAS_MCMV2.pdf)>. Acesso em: 31 maio. 2015.

BRASIL. Instituto Nacional De Metrologia, Qualidade E Tecnologia (INMETRO). **Portaria 18** de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2012.

BRASIL. Instituto Nacional De Metrologia, Qualidade E Tecnologia (INMETRO). **Tabela de consumo de energia elétrica** – chuveiros elétricos. 2016b. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/chuveiro.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2018.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. **Processamento de Arquivos Climáticos para simulação do desempenho energético de edificações**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

CASSARD, H.; DENHOLM, P.; ONG, S. Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15 (2011) 3789-3800.

COAKLEY, D.; RAFTERY, P.; KEANE, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 37 (2014) 123-141.

DIAKOULAKI, D.; ZERVOS, A.; SARAFIDIS, J.; MIRASGEDIS, S. Cost benefit analysis for solar water heating systems. **Energy Conversion and Management**, 42 (2001) 1727-1739.

DIEDEREN, B. M. W. Legionella spp. and Legionnaires' disease. **Journal of Infection**, 56 (2008) 1-11.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley and Sons, 3<sup>rd</sup> ed. Hoboken, NJ. 2006.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Série: Estudos da Demanda de Energia**. Nota Técnica DEA 13/15. Demanda de Energia 2050. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>>. Acesso em: 09 maio 2018.

FUENTES, E.; ARCE, L.; SALOM, J. A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 81 (2018) 1530–1547.

FERREIRA, A. P.; CUNHA, C. L. N. Pesquisa de *Legionella pneumophila* nas redes de abastecimento hospitalar. RECIIS – **Revista Eletrônica de Comunicação Informação e Inovação em Saúde**. Rio de Janeiro, v. 1, n.2, p. 208-214, jul.-dez., 2007.

GIGLIO, T. G. F. Influência do usuário na economia de energia obtida por meio do uso de sistemas de aquecimento solar de água em habitações de interesse social. 257p. Tese Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

GIGLIO, T.; LAMBERTS, R. Savings related to solar water heating system: A case study of low-income families in Brazil. **Energy and Buildings**, 130 (2016) 434-442.

GIGLIO, T.; LAMBERTS, R.; BARBOSA, M.; URBANO, M. A procedure for analyzing energy savings in multiple small solar water heaters installed in low-income housing in Brazil. **Energy Policy**, 72 (2014) 43-55.

GLEMBIN, J.; ADAM, M. DEIDERT, J.; JAGNOW, K.; ROCKENDORF, G.; WIRTH, H. P. Simulation and evaluation of different boiler implementations and configurations in solar thermal combi systems. **Energy Procedia**, 30 (2012) 601–610.

GUNERHAN, H.; HEPBASLI, A. Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. **Building and Environment**, 42 (2007) 779-783.

GUO, C.; JI, J.; SUN, W.; MA, J.; HE, W.; WANG, Y. Numerical simulation and experimental validation of tri-functional photovoltaic/thermal solar collector. **Solar Energy**, 87 (2015) 1-11.

HANG, Y.; QU, M.; ZHAO, F. Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States. **Energy and Buildings**, 45 (2012) 181-188.

HASAN, A. Optimization of domestic solar water heating system. **Solar Energy**, 17 (1995) 135–144.

HASAN, A. Thermosyphon solar water heaters: effect of storage tank volume and configuration on efficiency. **Energy Conversion and Management**, 38 (1997) 847–854.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). **Legionnaire's disease. The control of legionella bacteria in water systems**. 4. ed., Reino Unido, 2013. Disponível em: <<http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/l8.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2018.

HENDRON, R.; ANDERSON, R.; CHRISTENSEN C.; EASTMENT, M.; REEVES, P. Development of an Energy Savings Benchmark for All Residential End-Uses, in: **SIMBUILD 2004 Conference**, Boulder, Colorado, August 4-6, 2004, 2004: pp. 1–11.

HOBBI, A.; SIDDIQUI, K. Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. **Solar Energy**, 83 (2009) 700–714.

HOLLANDS, K. G.; LIGHTSTONE, M. F. A review of low-flow, stratified-tank solar water heating system. **Solar Energy**, 43 (1989) 97–105.

HOTTEL, H.C.; WOERTZ, B.B. The performance of flat-plate solar heat collectors. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**, 64 (1942) 64–91.

HOTTEL, H. C.; WHILLIER, Evaluation of flat-plate collector performance. **Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy**, Vol.2. Tucson: University of Arizona Press, (1958).

HU, S.; YAN, D.; GUO, S.; CUI, Y.; DONG, B. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. **Energy and Buildings**, 148, (2017) 366-378.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: Síntese de Indicadores 2013. Rio de Janeiro: IBGE, 2014. Tabela 6.1 Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/indicadoresminimos/sinteseindicsoais2014/default.shtm>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

IEA – International Energy Agency. **Technology Roadmap. Solar Heating and Cooling**. IEA, 2012. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/>>. Acesso em: 05 mar. 2018.

IEA – International Energy Agency. **Transition to Sustainable Buildings, Strategies and Opportunities to 2050**. IEA, 2013. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/>>. Acesso em: 01 maio 2018.

IEA – International Energy Agency. **World Energy Balances: Overview**. IEA, 2017. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. **Portaria nº229 de 23 de agosto de 2018**. Brasília, 2018.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. COMISSÃO SETORIAL PARA ÁGUA (CS/04). **Prevenção e Controle de Legionella nos Sistemas de Água**. 2ª ed., 2014. Disponível em:<[http://www1.ipq.pt/PT/SPQ/ComissoesSectoriais/CS04/Documents/Brochura\\_Legionella\\_2014.pdf](http://www1.ipq.pt/PT/SPQ/ComissoesSectoriais/CS04/Documents/Brochura_Legionella_2014.pdf)>. Acesso em: 02 out. 2018.

JACOVIDES, C. P.; HADJIOANNOU, L.; PASHIARDIS, S.; STEFANOU, L. On the diffuse fraction of a daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. **Solar Energy**, 56 (1996) 565-572.

JAISANKAR, S.; ANANTH, J.; THULASI, S.; JAYASUTHAKAR, S. T.; SHEEBA, K. N. A comprehensive review on solar water heaters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15 (2011) 3045-3050.

JAMAR, A.; MAJID, Z. A. A.; AZMI, W. H.; NORHAFANA, M.; RAZAK, A. A. A review of water heating system for solar energy applications. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 76 (2016) 178-187.

KALOGIROU, S. **Solar Energy Engineering. Processes and Systems**. Academic Press, 1<sup>st</sup> ed. Burlington, MA. 2009b.

KALOGIROU, S. Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. **Solar Energy**, 83, (2009a) 39-48.

KALOGIROU, S.; PAPAMARCOU, CG. Modelling of thermosiphon solar water heating system and simple model validation. **Energy and Buildings**, 21 (2000) 471-493.

KAZDABA, H.; BAH, A.; IDLIMAM, R.; ANSARI, O.; MALHA, M.; ASBIK, M. Experimental validation of an indirect solar water heater with forced circulation in various weather: application to Rabat (Morocco). **3<sup>rd</sup> International Conference on Electrical and Information Technologies ICEIT**, (2017).

LAVAN, Z.; THOMPSON, J. Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks. **Solar Energy**, 19 (1977) 519-524.

LEIDL, C. M.; LUBITZ, W.D. Comparing domestic water heating technologies. **Technology in Society**, 31 (2009) 244-256.

LIMA, J. M. A. Otimização de sistemas de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS. 123p. Dissertação Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LI, T.; LIU, Y.; WANG, D.; SHANG, K.; LIU, J. **Optimization analysis on storage tank volume in solar heating system**. Procedia Engineering, 121 (2015) 1356–1364.

MENDONÇA, B. V. Estudo da problemática da aplicação de coletores solares para aquecimento de água, no seguimento habitacional de alto padrão, com base em escalas de projeto arquitetônico e dimensões de planejamento. 176p. Dissertação Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MICHAELIDIS, I. M.; WILSON, D. R. Simulation studies of the position of the auxiliary heater in thermosiphon solar water heating systems. **Renewable Energy**, 10 (1997) 35–42.

MOGHADAM, H.; TABRIZI, F. F.; SHARAK, A. Z. Optimization of solar flat plat collector inclination. **Desalination**, 265 (2011) 107–111.

MOURSHED, M. Climatic parameters for building energy applications: A temporal-geospatial assessment of temperature indicators. **Renewable Energy**, 94 (2016) 55–71.

NASPOLINI, H.; MILITÃO, H. S. G.; RÜTHER, R. The role and benefits of solar water heating in the energy demands of low-income dwellings in Brazil. **Energy Conversion and Management**, 51 (2010) 2835–2845.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Uso racional: a fonte energética oculta. **Estudos Avançados**, 2007, vol.21, n.59, pp.91-105. ISSN 0103-4014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142007000100008>>. Acesso em: 02 ago. 2018.

PASSOS, L.; CARDEMIL, J. M.; COLLE, S. Feasibility study of using domestic solar hot water systems as alternative to reduce the electricity peak demand in Brazil. **Energy Procedia**, 57 (2014) 2487-2495.

PEREIRA, W.; BÖGLA, A.; NATSCHLÄGER, T. Sensitivity analysis and validation of an EnergyPlus model of a house in upper Austria. **Energy Procedia**, 62 (2014) 472-481.

QU, M.; YIN, H.; ARCHER, D. H. A solar thermal cooling and heating system for a building: Experimental and model based performance analysis and design. **Solar Energy**, 84 (2010) 166–182.

RAFFENEL, Y.; FABRIZIO, E.; VIRGONE, J.; BLANCO, E.; FILIPPI, M. Integrated Solar heating systems: from initial sizing procedure to dynamic simulation. **Solar Energy**, 83 (2009) 657–663.

RAJAB, Z.; ZUHIER, M.; KHALIL, A.; EL-FAITOURI, A. Techno-Economic Feasibility Study of Solar Water Heating System in Libya. **The 8<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress**, 2017.

RAIMO, P. A. **Aquecimento de água no setor residencial**. 124p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK. **Renewables 2015: Global Status Report**. 2015. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf)>. Acesso em: 06 fev 2017.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK. **Renewables 2017: Global Status Report**. 2017. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399\\_GSR\\_2017\\_Full\\_Report\\_0621\\_Opt.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf)>. Acesso em: 05 maio 2018.

RODRÍGUEZ-HIDALGO, M. C.; RODRÍGUEZ-AUMENTE, P. A.; LECUONA, A.; LEGRAND, M.; VENTAS, R. Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank. **Applied Energy**, 97 (2012) 897-906.

SALAZAR, J. P. L. C. Economia de energia e redução do pico da curva de demanda para consumidores de baixa renda por agregação de energia solar térmica. 118p. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SANGOI, J. M. **Análise comparativa do desempenho de sistemas de aquecimento de água em edificações residenciais**. 270p. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SANTIN, O. G.; ITARD, L.; VISSCHER, H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. **Energy Buildings**, 41 (2009) 1223–1232.

SANTOS, I. P.; RÜTHER, R. Avaliação das características das coberturas das residências unifamiliares para o aproveitamento da energia solar. **X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, (2009) 1065–1075.

SHARIAH, A.; AL-AKHRAS, M.; AL-OMARI, I. A. Optimizing the tilt angle of solar collectors. **Renewable Energy**, 26 (2002) 587–598.

SHARIAH, A. M.; LÖF, G. O. G. The optimization of tank-volume-to-collector-area ratio for a thermosiphon solar water heater. **Renewable Energy**, 3 (1996) 289–300.

SHARIAH, A.; SHALABI, B. Optimal design for a thermosiphon solar water heater. **Renewable Energy**, 11 (1997) 351–361.

SHRIVASTAVA, R. L.; KUMAR, V.; UNTAWALE, S. P. Modeling and simulation of solar water heater: a TRNSYS perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 67 (2017) 126-143.

SHUKLA, R.; SUMATHY, K.; ERICKSON, P.; GONG, J. Recent advances in the solar water heating systems, A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 19 (2013) 173-190.

SKEIKER, K. Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria. **Energy Conversion and Management**, 50 (2009) 2039–2448.

SKERLIĆ, J.; RADULOVIĆ, J.; NICOLIĆ, D.; BOJIĆ, M. Maximizing performances of variable tilt flat-plate solar collectors for Belgrade (Serbia). **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 5 (2013) 1–15.

SOULAYMAN, S.; HAMMOUD, M. Optimum tilt angle of solar collectors for building applications in mid-latitude zone. **Energy Conversion and Management**, 124 (2016) 20–28.

STARKE, A. R.; RUAS, T. D. M.; ABREU, S. L.; CARDEMIL, J. M.; COLLE, S. Multi-objective and multi-parameter optimization of solar domestic hot-water systems for reducing on-peak power consumption. **Solar World Congress**, 2015.

STRAPASSON, A. B. A energia térmica e o paradoxo da eficiência energética - Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético. 130p. Dissertação Mestrado –Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TABOR, H. Radiation, convection and conduction coefficients in solar collectors. **Journal Bull. Res. Council of Israel**, Vol. 6C (1958) 155.

TABORIANSKI, V. M. Avaliação da contribuição das tipologias de aquecimento de água residencial para a variação do estoque de gases de efeito estufa na atmosfera. 118p. Dissertação Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Comparative evaluation of the contribution of residential water heating systems to the variation of greenhouse gases stock in the atmosphere. **Building and Environment**, 39 (2004) 645-652.

TELEBIZADEH, P.; MEHRABIAN, M. A.; ABDOLZADEH, M. Prediction of the optimum slope and surface azimuth angles using the Genetic Algorithm. **Energy and Buildings**, 43 (2011) 2998-3005.

TIGRE. PREDIAL AQUATHERM **Ficha Técnica**. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/sites/default/files/produtos/catalogos/ct-aquaterm.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2018.

TIGRE. PPR TERMOFUSÃO **Ficha Técnica**. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/sites/default/files/produtos/catalogos/ppr-termofusao.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2018.

TSILINGIRIDIS, G.; MARTINOPOULOS, G.; KYRIAKIS, N. Life cycle environmental impact of a thermosyphonic domestic solar hot water system in comparison with electrical and gas water heating. **Renewable Energy**, 29 (2004) 1277-1288.

VIEIRA, A. S.; BEAL, C. D.; STEWART, R. A. Residential water heaters in Brisbane, Australia: thinking beyond technology selection to enhance energy efficiency and level of service. **Energy and Buildings**, 82 (2014) 222–236.

VIEIRA, A. S.; HUMPHRYS, S.; BEAL, C. D.; STEWART, R. A. Optimizing residential water heating system performance to minimize water-energy penalties. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, vol. 4, Issue 2 (2016) 161–172.

VIEIRA, A. S.; STEWART, R. A.; LAMBERTS, R.; BEAL, C. D. Residential solar water heaters in Brisbane, Australia: Key performance parameters and indicators. **Renewable Energy**, 116 (2018) 120-132.

WEISS, W.; SPÖRK-DÜR, M.; MAUTHNER, F. **Solar Heat Worldwide, Global Market Development and Trends in 2016**. 2017. IEA, Solar Heating & Cooling Programme. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/>>. Acesso em: 07 jan. 2018.

WIT, S.; ALGENBROE, G. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. **Energy and Buildings**, 34 (2002) 951-958.

ZAMADEI, T. **Radiação global e difusa diária na região de transição Cerrado-Amazônia do Mato Grosso**. 118p. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2015.

ZHOU, Y. P.; WU, J. Y.; WANG, R. Z.; SHIOCHI, S.; LI, Y. M. Simulation and experimental validation of a variable-refrigerant-volume (VRV) air-conditioning system in EnergyPlus. **Energy and Buildings**, 40 (2008) 1041-1047.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

## DADOS CLIMATICOS DA CIDADE DE LONDRINA

Tabela 24 – Condições climáticas gerais.

	12/jul	13/jul	14/jul	21/dez	22/dez	23/dez	24/dez
<b>Velocidade média do vento (m/s)</b>	1,36	1,41	1,28	3,70	3,68	3,35	2,38
<b>Direção do vento</b>	270	270	270	135	135	135	90
<b>Pressão barométrica (Pa)</b>	95590	95480	95280	94480	94540	96510	94590
<b>Temp. bulbo úmido (°C)</b>	15,6	16,2	16,47	21,27	21,53	21,53	21,87
<b>Temp. máx. bulb seco</b>	23,8	26	26,6	32,8	32,6	30	31,8
<b>Amplitude temp. b. seco</b>	10,6	12	12,6	8,6	8,4	5,8	7,8

Fonte: SIMEPAR e INMET (2013).

Tabela 25 – Radiação solar global no plano horizontal (W/m<sup>2</sup>).

	12/JUL	13/JUL	14/JUL	21/DEZ	22/DEZ	23/DEZ	24/DEZ
<b>01:00</b>	1	1	0	1	1	1	1
<b>02:00</b>	1	1	0	1	1	1	1
<b>03:00</b>	1	1	0,5	1	1	1	1
<b>04:00</b>	1	1	0,2	1	1	1	1
<b>05:00</b>	1	1	0,2	1	1	1	1
<b>06:00</b>	1	1	1	8	5,5	6,2	6
<b>07:00</b>	1	1,2	1	85,2	81,5	77,5	92
<b>08:00</b>	48	54	53,2	228,8	230,5	198,2	218,5
<b>09:00</b>	236,2	233,2	237,2	382,2	364,8	375,5	389,2
<b>10:00</b>	449	448,8	453	533,8	492,5	553,2	496
<b>11:00</b>	624,2	627,5	630,8	650,5	619,2	515,8	458,2
<b>12:00</b>	683	745,5	750,2	725,5	650,8	557,8	677,5
<b>13:00</b>	758	807,5	800,8	728,5	556	411,8	645,2
<b>14:00</b>	637	735,2	733,8	665,2	625,5	537	379
<b>15:00</b>	435,8	468,5	430	506	541,2	378,2	505
<b>16:00</b>	524	351,8	504,5	518,2	483	458,2	465,5
<b>17:00</b>	271	302,2	299,5	342	382,8	233,2	430,8
<b>18:00</b>	51,5	69,5	64	210,5	181,2	222,8	166
<b>19:00</b>	1,2	1,2	1	80	81,5	52	72,8
<b>20:00</b>	1	0,5	0,2	2	3	3,8	3
<b>21:00</b>	1	0,8	1	1	1	1	1
<b>22:00</b>	1	0,5	1	1	1	1	1
<b>23:00</b>	1	0	1	1	1	1	1
<b>00:00</b>	1	0	1	1	1	1	1

Fonte: SIMEPAR.

Tabela 26 – Temperatura média ambiente em °C.

	12/JUL	13/JUL	14/JUL	21/DEZ	22/DEZ	23/DEZ	24/DEZ
<b>01:00</b>	13,7	14,1	16,1	22,5	22	21,9	23,5
<b>02:00</b>	13,3	13,4	15	21,4	21,7	21,5	22,8
<b>03:00</b>	12,9	13	14,1	20,6	21,3	21,2	21,9
<b>04:00</b>	13,4	13,2	13,7	20	20,6	20,6	21,1
<b>05:00</b>	11,9	13,7	13,7	19,5	19,7	20	20,4
<b>06:00</b>	12,1	12,2	13,8	19,2	18,8	19,6	19,8
<b>07:00</b>	12,2	12	12,1	20,3	19,8	20,8	21,3
<b>08:00</b>	12,3	12,7	12,2	21,7	21,9	22,6	22,6
<b>09:00</b>	14,2	15,3	14,7	23,3	23,8	24,2	24
<b>10:00</b>	16,1	17,4	17,4	25	25,5	26,2	25,4
<b>11:00</b>	18,6	19,2	20,2	26,6	27	26,6	26,1
<b>12:00</b>	20,2	21,6	21,9	28	28,1	27,2	27,9
<b>13:00</b>	21,9	23,5	24	29,1	28,6	27,6	29,3
<b>14:00</b>	22,9	24,5	24,9	29,8	29,9	28,7	29,8
<b>15:00</b>	23,4	25,3	25,9	30,3	30,4	28,8	30,8
<b>16:00</b>	23,9	25	26,2	31,3	30,9	29,9	31,1
<b>17:00</b>	23,3	25,3	26,5	30,8	31,1	29,1	32,1
<b>18:00</b>	21,2	23,9	23,9	30,6	30,2	29,2	31,4
<b>19:00</b>	19,8	22,3	21,7	29,4	29,1	27,9	30,2
<b>20:00</b>	19,4	20,6	20,4	27,6	26,1	26,6	28
<b>21:00</b>	18,2	18,1	19,7	26,1	24,4	25,5	27,5
<b>22:00</b>	16,8	17	18,5	25,5	23,5	25,3	27,3
<b>23:00</b>	16,5	16,9	17,8	24,9	22,9	25,3	25,9
<b>00:00</b>	15,2	16,4	17,7	23,4	22,5	24,4	24,7

Fonte: SIMEPAR.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE A

### FRAÇÕES DIRETA E DIFUSA DA RADIAÇÃO SOLAR CALCULADAS PARA A CIDADE DE LONDRINA

Tabela 27 – Radiação solar difusa no plano horizontal em W/m<sup>2</sup>.

	12/JUL	13/JUL	14/JUL	21/DEZ	22/DEZ	23/DEZ	24/DEZ
<b>01:00</b>	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>02:00</b>	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>03:00</b>	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>04:00</b>	1,00	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>05:00</b>	1,00	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>06:00</b>	1,00	1,00	1,00	7,91	5,46	6,15	5,95
<b>07:00</b>	1,00	1,20	1,00	83,75	79,91	76,06	90,07
<b>08:00</b>	47,11	52,88	52,31	210,49	211,48	189,67	204,14
<b>09:00</b>	164,13	165,76	165,66	319,71	314,91	318,12	321,17
<b>10:00</b>	154,98	156,95	154,77	397,37	397,55	394,15	397,95
<b>11:00</b>	121,37	120,86	120,43	439,91	448,19	441,76	417,32
<b>12:00</b>	131,03	128,65	130,51	451,91	476,52	471,63	470,74
<b>13:00</b>	125,07	133,24	132,13	450,41	471,13	393,78	477,42
<b>14:00</b>	115,67	121,31	121,08	434,42	446,92	447,19	364,05
<b>15:00</b>	167,56	138,21	176,52	398,50	396,40	352,77	398,55
<b>16:00</b>	86,46	77,71	83,24	288,58	308,34	317,53	315,28
<b>17:00</b>	44,72	49,86	49,42	222,22	198,14	213,00	156,17
<b>18:00</b>	8,50	11,47	10,56	112,26	126,94	102,63	128,95
<b>19:00</b>	1,20	1,20	1,00	13,20	13,45	8,80	12,01
<b>20:00</b>	1,00	0,50	0,20	2,00	3,00	3,81	3,00
<b>21:00</b>	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>22:00</b>	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>23:00</b>	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>00:00</b>	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



### APÊNDICE B

#### IMPACTO NOS INDICADORES DE DESEMPENHO EM CONDIÇÕES DE LIMITAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO COLETOR SOLAR.

Figura 30 – Impacto do volume do tanque na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.

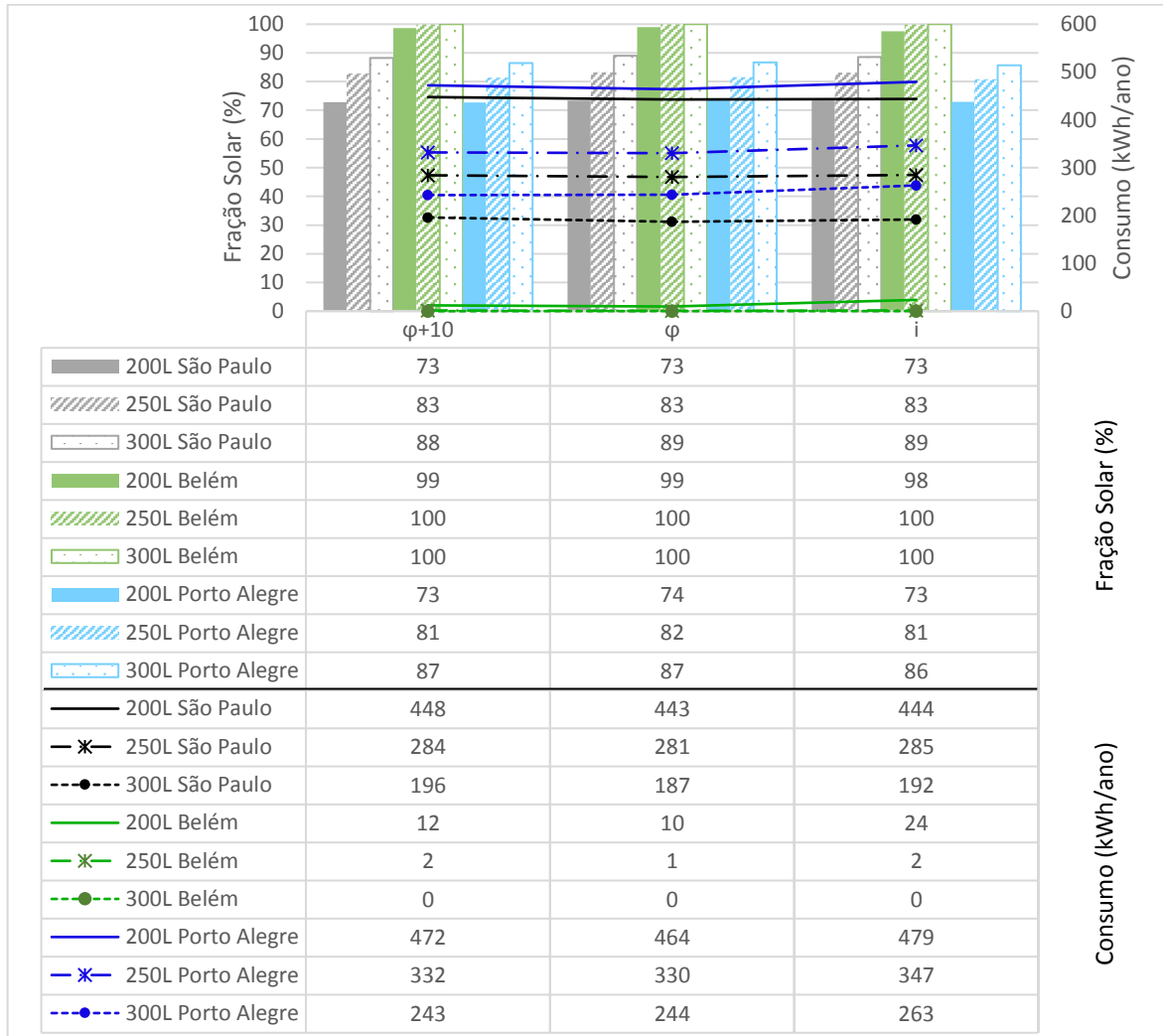


Figura 31 – Impacto do horário de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.

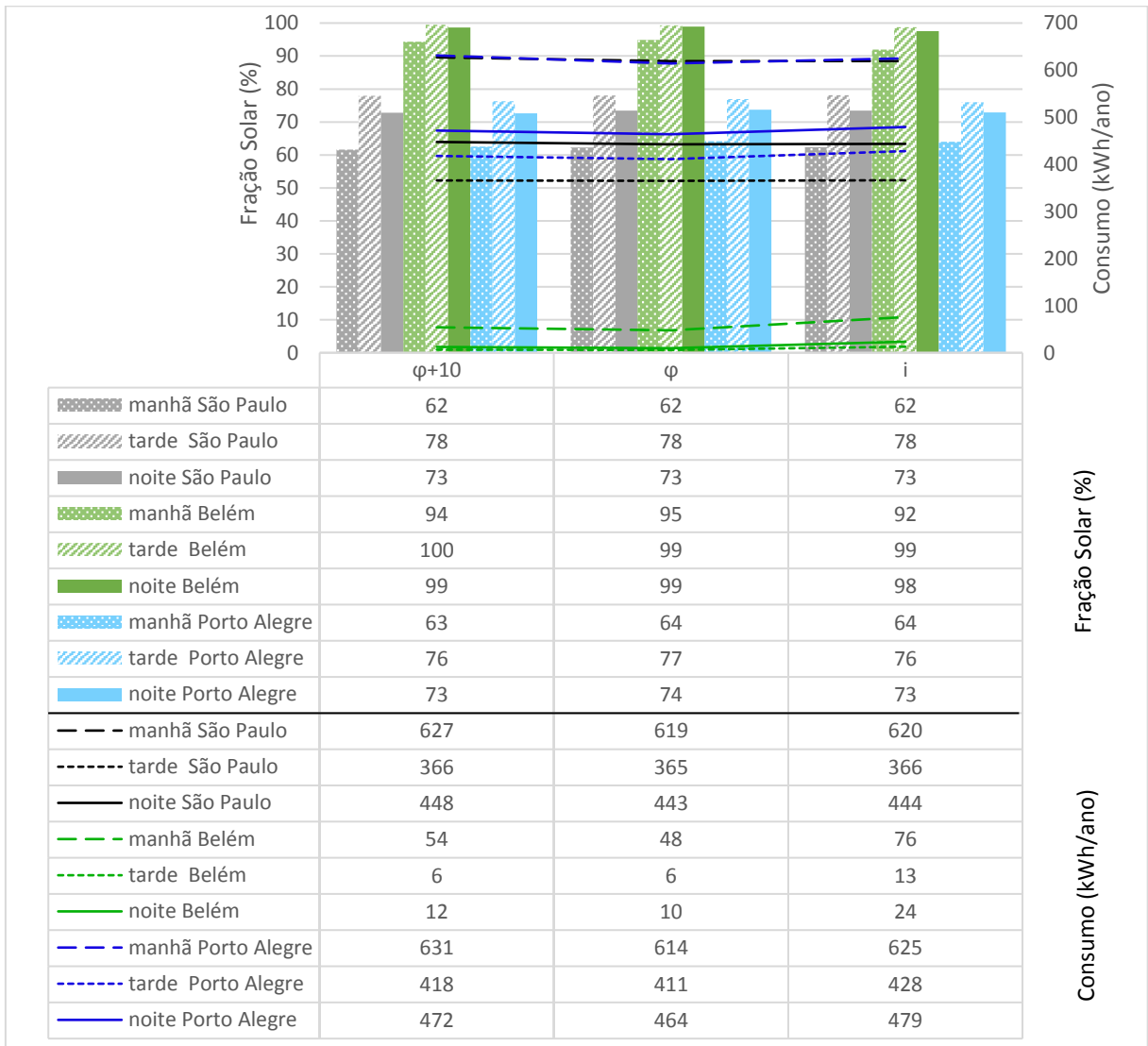


Figura 32 – Impacto do nível de conforto do banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.

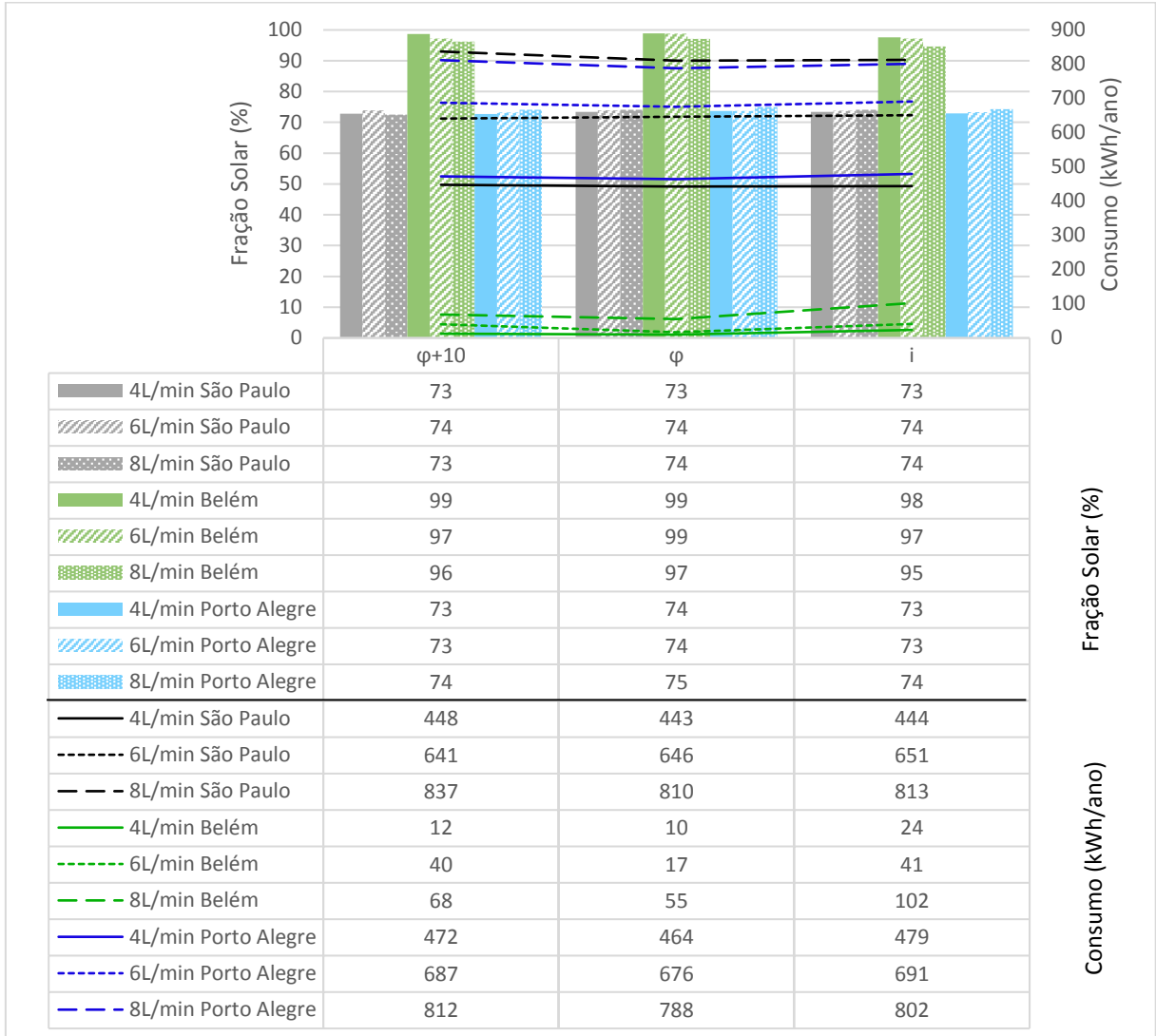


Figura 33 – Impacto da localização do tanque de armazenamento na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.

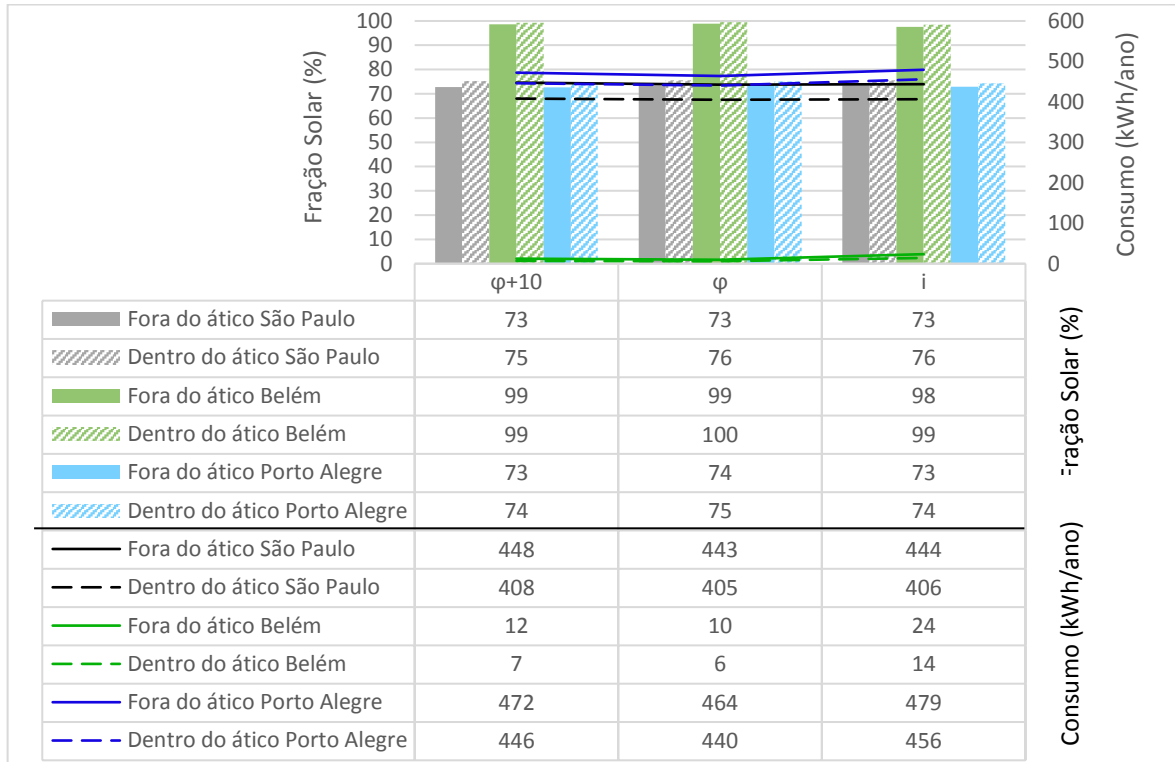
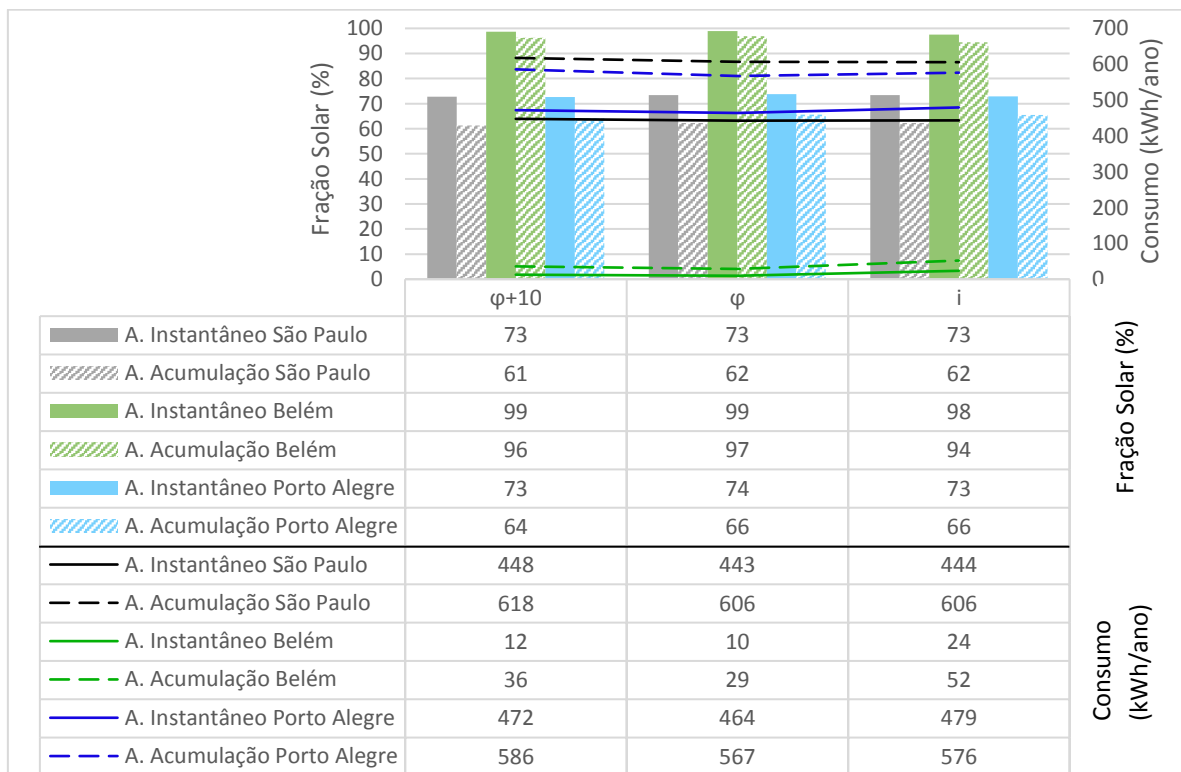


Figura 34 – Impacto do *backup* na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da inclinação do coletor.



### APÊNDICE C

#### IMPACTO NOS INDICADORES DE DESEMPENHO EM CONDIÇÕES DE LIMITAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DO TANQUE DE ARMAZENAMENTO.

Figura 35 - Impacto da relação  $V_{ar}/A_{col}$  na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento.

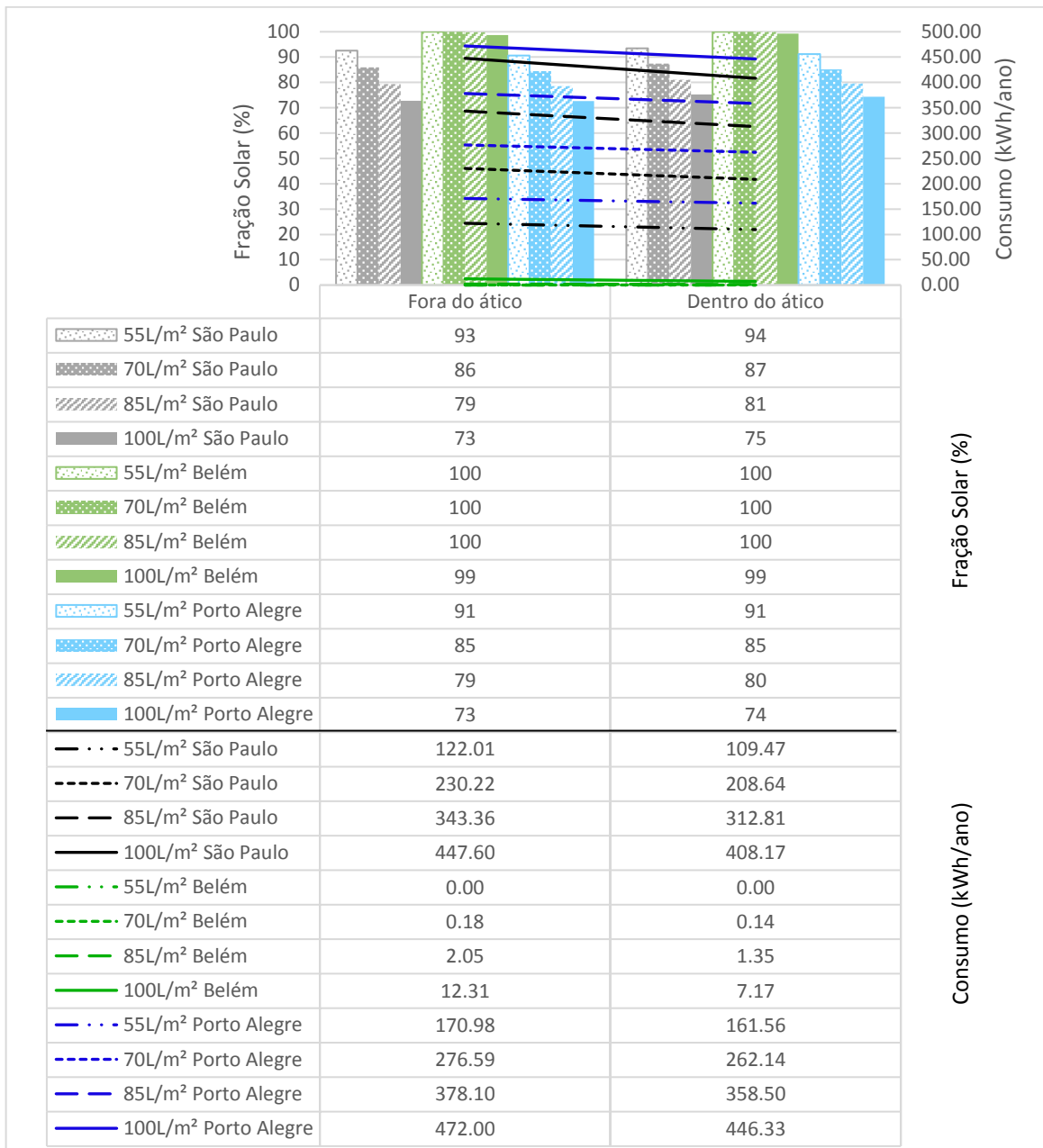


Figura 36 – Impacto do horário de banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento.

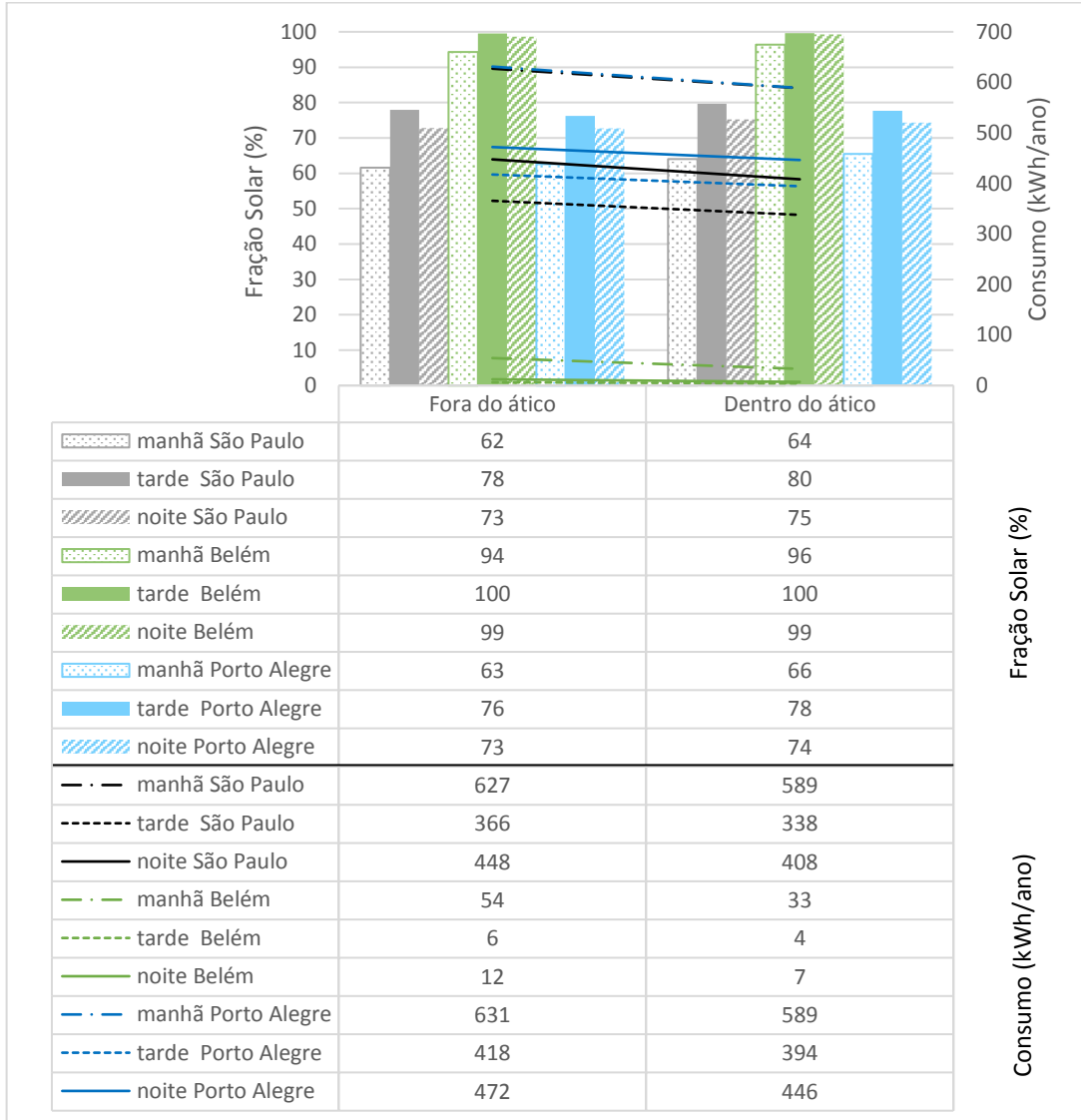


Figura 37 – Impacto do nível de conforto do banho na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento.

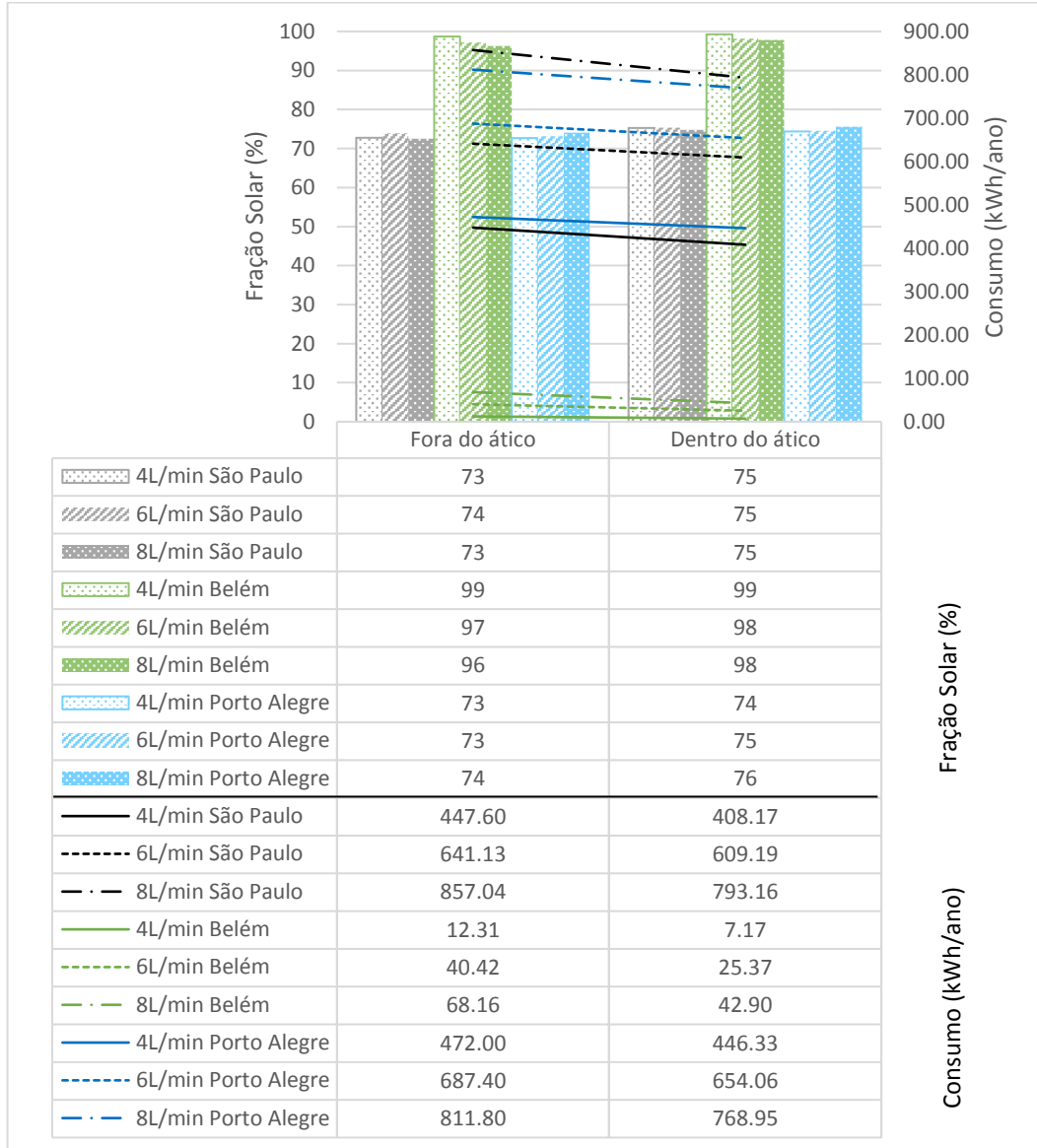


Figura 38 – Impacto do tipo de *backup* na Fração Solar (%) e no Consumo Anual de Energia (kWh) em condições de limitação da localização do tanque de armazenamento.

