



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE COLETOR**  
**SOLAR PARA REPRODUÇÃO DAS CONDIÇÕES DE**  
**OPERAÇÃO DE UMA BOMBA DE CALOR PARA**  
**AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL**

**Autor: Oscar Ricardo Sandoval Rodríguez**

**Orientador: Ricardo Nicolau Nassar Koury**

**Belo Horizonte, 13 de março de 2015**

**Oscar Ricardo Sandoval Rodriguez**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE COLETOR  
SOLAR PARA REPRODUÇÃO DAS CONDIÇÕES DE  
OPERAÇÃO DE UMA BOMBA DE CALOR PARA  
AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Ricardo Nicolau Nassar Koury

Co-orientador: Antônio Augusto Torres Maia

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

S218d

Sandoval Rodriguez, Oscar Ricardo.

Desenvolvimento de um simulador de coletor solar para reprodução das condições de operação de uma bomba de calor para aquecimento de água residencial [manuscrito] / Oscar Ricardo Sandoval Rodriguez. – 2015.

117 f., enc.: il.

Orientador: Ricardo Nicolau Nassar Koury.

Coorientador: Antônio Augusto Torres Maia.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 101-117.

Bibliografia: f. 96-100.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Energia solar - Teses. 3. Radiação solar - Teses. 4. Coletores solares - Teses. I. Koury, Ricardo Nicolau Nassar. II. Maia, Antônio Augusto Torres. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG.

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax. +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE COLETOR  
SOLAR PARA REPRODUÇÃO DAS CONDIÇÕES DE  
OPERAÇÃO DE UMA BOMBA DE CALOR PARA  
AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL**

**OSCAR RICARDO SANDOVAL RODRÍGUEZ**

Dissertação defendida e aprovada o dia 13 de março de 2015, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de Energia e sustentabilidade.

Por:

**PROF. RICARDO NICOLAU NASSAR KOURY**

Orientador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG.

**PROF. ANTÔNIO AUGUSTO TORRES MAIA**

Co-orientador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG.

**PROF. LUIZ MACHADO**

Examinador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG.

**PROF. MATHEUS PEREIRA PORTO**

Examinador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG.

**PROF. RALNEY NOGUEIRA DE FARIA**

Examinador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET.

*"Nunca pares, nunca te conformes, hasta  
que lo bueno sea mejor y lo mejor  
excelente"*

**Gym Rizo.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por conceder-me a vida e enche-la cada dia de confiança, dedicação, perseverança, ânimos e juízo para continuar minha aprendizagem.

Agradeço a minha família por brindar-me apoio sem importar a distância. Ao meu pai pelo ânimo e pelo exemplo de vida, aos meus irmãos pelos momentos de amor, carinho e palavras de motivação que permitiram-me culminar esta etapa tão importante. Às minhas lindas sobrinhas, quem são o motor da minha vida, são as pessoas mais importantes para mim e cada dia incentivam-me a buscar o conhecimento.

Aos meus professores, a todos e cada um deles, que desde criança inculcaram em mim seus conhecimentos e as suas experiências, em especial agradeço ao professor e amigo Dr. José Ricardo Bermúdez Santaella, quem é um excelente modelo a seguir e uma das principais pessoas em oferecer-me motivação diária para alcançar os meus sonhos.

Ao Professor Dr. Oscar Saul Hernández Mendoza quem foi a principal pessoa em motivar-me e incentivar-me para começar os meus estudos de mestrado e doutorado na Universidade Federal de Minas Gerais.

Ao Professor Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury e ao Professor Dr. Antônio Augusto Torres Maia por ter-me recebido com generosidade no programa de pós-graduação e ser o orientador e co-orientador desta dissertação, pela confiança depositada em mim, pelo apoio, dedicação e ensinamentos constantes.

Aos professores das disciplinas do curso, aos professores Dr. Matheus Pereira Porto e Dr. Luiz Machado por suas boas energias e pelos bons conselhos.

Também, com muito apreço e carinho ao professor Dr. Márcio Fonte Boa Cortez pela paciência e pelo conhecimento transmitido em cada uma das assessorias, que sem elas, este projeto não conseguiria culminar-se.

Ao professor Dr. Ramón Molina Valle e a sua querida esposa Heloisa de Cássia Reis Molina que ao longo da minha experiência no Brasil e do meu curso de mestrado proveram constantemente o seu apoio e a sua amizade.

A Vanessa Anicio de Moraes e Silva e a sua família, quem brindam-me apoio constante, carinho e amor, tornando meus dias de trabalho muito agradáveis.

A Marina Cândida de Miranda Costa, quem sempre estendeu o seu carinho e a sua amabilidade com a finalidade de fazer-me sentir em casa.

Aos meus colegas, amigos e irmãos Carlos Eduardo Castilla e Juan José Garcia, sempre formando um grupo forte e indestrutível, cheio de ideias e soluções a inúmeros de problemas que tivemos que enfrentar.

À empresa MAXTEMPER pela construção da bancada experimental utilizada nesta pesquisa.

Meus mais grandes e sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Com o aumento da procura por energias renováveis, o uso da energia solar vem sendo amplamente estudado. O Brasil é um país privilegiado, considerando os altos índices de radiação solar recebido em quase todo o território nacional. No entanto, há dias em que existe um déficit na energia solar, seja por o dia estar nublado ou com chuva. Por isto, coletores solares precisam de uma fonte de apoio para contribuir no aquecimento da água até que a temperatura adequada seja atingida. Neste trabalho foi realizado o estudo experimental de uma bomba de calor a R-134a, como dispositivo de apoio a um coletor solar para aquecimento de água na cidade de Belo Horizonte – MG. Para simular a operação do sistema, foi utilizado um conjunto de resistências elétricas para, mediante uma etapa de controle de potência, simular valores anuais históricos de radiação solar. Nos resultados obtidos, foi observado que apenas no mês de janeiro atinge-se mediante a coleta da energia solar a temperatura de 45°C no reservatório, e nos outros onze meses é necessário o uso da bomba de calor para conseguir atingir essa temperatura. Com a bomba de calor operando em condições similares às condições reais obteve-se um coeficiente de performance médio de 1,88, um consumo médio anual de 137,65 kWh e um custo de R\$ 54,57. Por último, os resultados deste trabalho demonstraram que mediante esta metodologia é possível desenvolver simuladores solares confiáveis que permitam estudar o comportamento e as características de novos sistemas de apoio para coletores solares.

*Palavras chaves:* Aquecimento de água residencial, bomba de calor, radiação solar, simulador solar.

## ABSTRACT

With the increased demand for renewable energy, the use of solar energy has been widely studied. Brazil is a privileged country, considering the high levels of solar radiation received in almost all the national territory. However, there are days that there is a deficit in solar energy, because the day is cloudy or rainy. Therefore, solar collectors need an additional energy source to contribute to the heating of the water until the desired temperature is reached. In this work is presented the experimental study of a heat pump working with R-134a, as a device to support a solar collector for heating water in the city of Belo Horizonte - MG. To simulate the operation of the system, it was employed a set of electrical resistances for simulating historical values of annual solar radiation. This study revealed that only in January the use of solar energy is enough to reach the temperature of 45°C in the reservoir, and the other eleven months it is necessary to use the heat pump to achieve that temperature. With the heat pump operating close to the real conditions the coefficient of performance obtained was 1.88, an average annual consumption of 137.65 kWh with a cost of R \$ 54.57. Finally, the results show that by this method it is possible to develop reliable solar simulators in order to study the behavior and characteristics of new support systems for solar collectors.

*Keywords:* residential water heating, heat pump, static evaporator, solar radiation, solar simulator.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1 O panorama atual do uso da energia solar para aquecimento de água no Brasil e no mundo.....	28
2.2 O uso da energia solar para o aquecimento de água no Brasil.....	29
2.3 Mercado consumidor de energia elétrica no setor residencial no Brasil.....	30
2.4 Disponibilidade e utilização da energia solar no Brasil.....	31
2.5 Características físicas associadas ao uso da energia solar.....	32
2.5.1 A constante solar.....	32
2.5.2 A atenuação da radiação solar pela atmosfera.....	33
2.5.3 Os ângulos de incidência da radiação solar.....	33
2.6 Trabalhos similares desenvolvidos por outros autores.....	34
2.6.1 Coletores de placa plana e bombas de calor como sistemas de apoio aos dispositivos solares de aquecimento de água.....	34
2.6.2 Simulação de modelos solares, variabilidade das constantes solares, uso de dados obtidos por satélites geoestacionários e estimativas de radiação solar.....	39
2.7 Considerações finais.....	41
3. METODOLOGIA.....	43
3.1 Objeto de estudo.....	43
3.2 Coleta de dados.....	43
3.3 Caracterização da coleta de dados.....	44
3.4 Construção do algoritmo 1 – Ferramenta de simulação do comportamento térmico de um coletor solar.....	44
3.5 Caracterização do coletor simulado.....	51
3.6 Construção do algoritmo 2 – Simulador da demanda de água em uma casa de quatro habitantes.....	51
3.7 Construção do algoritmo 3 – Algoritmo de controle para acionamento do sistema de apoio (BDC).....	53
3.8 Interface do usuário.....	54
3.9 Cálculo da potência elétrica equivalente.....	55
3.10 Dias de simulação e temperatura ambiente simulada.....	59

3.11	Descrição do protótipo.....	60
3.11.1	Sistema de apoio (BDC).....	60
3.11.2	Sistema de simulação da placa coletora. ....	65
3.11.3	Componentes de controle. ....	66
3.12	Plano de ensaios. ....	68
3.13	Incertezas das medições.....	69
3.14	Considerações finais. ....	70
4.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	72
4.1	Análise do comportamento do consumo de água. ....	72
4.2	Análise dos dados de radiação solar. ....	72
4.3	Resultado dos ensaios.....	77
4.3.1	Comparação da radiação global diária média mensal em diferentes inclinações. ....	77
4.3.2	Radiação global, fração difusa e fração direta diária e horária média mensal no painel inclinado de simulação. ....	77
4.3.3	Nebulosidade mensal simulada. ....	79
4.3.4	Índice horário médio de claridade simulado.....	80
4.3.5	Radiação diária e horária média mensal total absorvida e perdas associadas. ....	80
4.3.6	Comportamento térmico no coletor simulado. ....	86
4.3.7	Temperatura da água no aproveitamento da energia solar. ....	88
4.3.8	Funcionamento do sistema auxiliar – BDC.....	89
4.3.9	Considerações finais.....	92
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	94
5.1	Conclusões.....	94
5.2	Recomendações para trabalhos futuros: .....	95
	REFERÊNCIAS .....	96
	ANEXO A .....	101
	ANEXO B .....	112
	ANEXO C .....	117

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Países que participaram do estudo da EIA-SHC. ....	28
FIGURA 2.2 – Capacidade total de coletores de aquecimento de água em operação nos 10 principais países até o ano 2011. ....	29
FIGURA 2.3 – Distribuição da radiação diária global média anual total na horizontal para o Brasil.....	32
FIGURA 2.4 – Componentes direta e difusa da radiação solar na superfície terrestre. ....	33
FIGURA 2.5 – (a) Ângulo zênite, declive, ângulo de azimute com respeito à superfície, e ângulo de azimute solar de acordo com a inclinação da superfície. (b) Plano visto desde o teto ilustrando o ângulo de azimute solar. ....	34
FIGURA 2.6 – Representação esquemática do sistema utilizado. ....	35
FIGURA 2.7 – Esquema do sistema avaliado no trabalho de Liu et al (2007). ....	36
FIGURA 2.8 – Esquema simplificado de uma montagem de painel solar com dispositivos auxiliares. (A) Painel solar térmico. (B) O sistema de água foi substituído por um sistema de compressão de vapor refrigerante.....	37
FIGURA 2.9 – Comportamento do COP como uma função da diferença entre a temperatura da água e a temperatura do ar ambiente. ....	38
FIGURA 2.10 – O gráfico superior apresenta a radiação global, difusa e direta para os dias 4, 5 e 6 de Outubro de 2002. O Gráfico inferior apresenta fração da cobertura de nuvens para o mesmo período observado com o imaginador desenvolvido na DMA/C.....	40
FIGURA 3.1 – Relação das variáveis envolvidas no algoritmo 1.....	45
FIGURA 3.2 – Interface do usuário, ferramenta de simulação coletor solar. ....	56
FIGURA 3.3 – Diagrama PID do mecanismo de apoio (BDC) .....	61
FIGURA 3.4 – Desenho esquemático do protótipo BDC. ....	62
FIGURA 3.5 – Compressor. ....	63
FIGURA 3.6 – Desenho da serpentina do evaporador estático. Cotas em mm.....	63
FIGURA 3.7 – Desenho do evaporador estático com a serpentina e a placa (aleta) dissipadora de calor .....	64
FIGURA 3.8 - Desenho do Condensador.....	64
FIGURA 3.9 – Condensador dentro do reservatório.....	65
FIGURA 3.10 – Válvula de expansão termostática Danfoss TEN2 R-134a.....	65

FIGURA 3.11 – Resistência elétrica enrolada no tubo de cobre do coletor solar para simular o efeito termossifão. ....	66
FIGURA 3.12 – Conjunto de resistências elétricas e tubos. ....	66
FIGURA 3.13 – Desenho do controle para acionamento de válvulas e acionamento da BDC. ....	67
FIGURA 3.14 – Desenho do controle para acionamento de válvulas e acionamento da BDC. ....	67
FIGURA 3.15 – Vista geral do equipamento. ....	68
FIGURA 4.1 – Posicionamento dos termopares no coletor solar simulador.....	86
FIGURA B.1 – Resultados da programação para cálculo da resistência elétrica.....	116

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1.1 – Fontes de energia utilizadas na matriz energética mundial. *Inclui geotérmica, solar, eólica, etc. ....	24
GRÁFICO 1.2 – Consumo final na carga residencial no Brasil.....	25
GRÁFICO 1.3 – Domicílios que possuem pelo menos um chuveiro elétrico no Brasil e regiões. ....	26
GRÁFICO 2.1 – Distribuição do total da capacidade instalada em operação por tipo de coletor em 2011. ....	29
GRÁFICO 2.2 – Distribuição regional da energia economizada pelos coletores solares com selo Procel em 2012 por região geográfica.....	30
GRÁFICO 2.3 – Indicadores de desenvolvimento em energia elétrica do Brasil ano 1971 até 2010, consumo de energia elétrica subtraindo o uso de chuveiros elétricos. ....	31
GRÁFICO 3.1 – Diagrama de fluxo do algoritmo 1. Simulador do comportamento térmico de um coletor solar baixo condições de radiação solar. ....	46
GRÁFICO 3.2 – Fluxograma do algoritmo 2. Simulador da demanda de água em uma casa de três habitantes. ....	52
GRÁFICO 3.3 – Fluxograma do algoritmo 3. Algoritmo de controle para acionamento da BDC. ....	53
GRÁFICO 4.1 – Comportamento das descargas de água. ....	72
GRÁFICO 4.2 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de janeiro, fevereiro e março. ....	73
GRÁFICO 4.3 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de abril, maio e junho. ....	74
GRÁFICO 4.4 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de julho, agosto e setembro. ....	74
GRÁFICO 4.5 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de outubro, novembro e dezembro ....	75
GRÁFICO 4.6 – Variação da radiação global diária média mensal para o mês de Julho com diferentes valores de inclinação no painel de simulação.....	77
GRÁFICO 4.7 – Radiação global, fração difusa e fração direta diária média mensal no plano inclinado de simulação. ....	78
GRÁFICO 4.8 – Quantidade de nuvens avaliadas nos dias de simulação. ....	79

GRÁFICO 4.9 – Comparação da variação horária da temperatura da água dentro do coletor simulador. ....	87
GRÁFICO 4.10 – Temperatura no reservatório (200 l) no transcorrer da simulação. ....	89
GRÁFICO 4.11 - Consumo médio em kWh da BDC para os meses do ano na cidade de Belo Horizonte. ....	90
GRÁFICO 4.12 – Gráfico do fluxo de caixa projetado para 15 anos – Belo Horizonte. ....	91
GRÁFICO 4.13 – Degradação do COP no mês de junho segundo aumenta a temperatura no reservatório ....	92

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Temperatura ambiente média nos meses do ano em Belo Horizonte .....	59
TABELA 3.2 – Dia médio recomendado durante o mês e valores de n .....	60
TABELA 3.3 – Incertezas expandidas dos parâmetros medidos .....	69
TABELA 3.4 – Cálculo da incerteza combinada do protótipo na medição do COP .....	70
TABELA 4.1 – Distribuição da radiação global horária média mensal e da radiação global diária média mensal que atinge uma superfície horizontal nos doze meses avaliados, cidade Belo Horizonte – MG.....	76
TABELA 4.2 – Perdas de energia solar registrada no processo de simulação.....	81
TABELA 4.3 – Distribuição da radiação global diária e horária média mensal em um painel inclinado 36° em cada mês de avaliação, cidade Belo Horizonte .....	82
TABELA 4.4 – Distribuição da fração direta diária e horária média mensal em um painel inclinado 36° em cada mês de avaliação, cidade Belo Horizonte .....	83
TABELA 4.5 – Distribuição da fração difusa diária e horária média mensal em um painel inclinado 36° em cada mês de avaliação, cidade Belo Horizonte .....	84
TABELA 4.6 – Distribuição da radiação diária e horária absorvida pela placa absorvedora em um painel inclinado 36° no dia médio de cada mês, cidade Belo Horizonte .....	85
TABELA 4.7 – Resultados experimentais da simulação – Mês de janeiro.....	87
TABELA 4.8 – Custos mensais médios da energia utilizada pela BDC funcionando como mecanismo de apoio .....	90
TABELA 4.9 – COP global da BDC.....	91
TABELA A.1 – Resultados experimentais da simulação – Mês de fevereiro .....	101
TABELA A.2 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de fevereiro .	101
TABELA A.3 – Resultados experimentais da simulação – Mês de março.....	102
TABELA A.4 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de março.....	102
TABELA A.5 – Resultados experimentais da simulação – Mês de abril .....	103
TABELA A.6 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de abril .....	103
TABELA A.7 – Resultados experimentais da simulação – Mês de maio.....	104
TABELA A.8 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de maio.....	104
TABELA A.9 – Resultados experimentais da simulação – Mês de junho.....	105
TABELA A.10 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de junho.....	105
TABELA A.11 – Resultados experimentais da simulação – Mês de julho.....	106
TABELA A.12 - Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de julho .....	106

TABELA A.13 – Resultados experimentais da simulação – Mês de agosto .....	107
TABELA A.14 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de agosto ...	107
TABELA A.15 – Resultados experimentais da simulação – Mês de setembro .....	108
TABELA A.16 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de setembro	108
TABELA A.17 – Resultados experimentais da simulação – Mês de outubro .....	109
TABELA A.18 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de outubro .	109
TABELA A.19 – Resultados experimentais da simulação – Mês de novembro.....	110
TABELA A.20 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de novembro .....	110
TABELA A.21 – Resultados experimentais da simulação – Mês de dezembro .....	111
TABELA A.22 – Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de dezembro .....	111
TABELA C.1 – Correção dos termopares para leitura de 0°C.....	117

## **LISTA DE QUADROS**

QUADRO 3.1 – Consumo doméstico de água por atividade .....	44
QUADRO 3.2 – Parâmetros do coletor simulado .....	51
QUADRO 3.3 – Lista de componentes da FIG 3.3 .....	61
QUADRO 4.1 – Parâmetros de comparação entre índices de claridade médios mensais.....	80
QUADRO 4.2 – Temperatura inicial da água no reservatório para a simulação dos meses ....	88

## NOMENCLATURA

### Siglas

<i>BDC</i>	Bomba de calor
<i>BDD</i>	Base de dados
<i>CEMIG</i>	Companhia energética de Minas Gerais
<i>COP</i>	Coeficiente de performance ou coeficiente de eficácia
<i>CRESESB</i>	Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito
<i>DEA</i>	Diretoria de estudos econômico-energéticos e ambientais
<i>DF</i>	Distrito Federal
<i>DST</i>	Teste de sistema dinâmico
<i>ELETRORBRAS</i>	Eletrabras - Centrais Elétricas Brasileiras S.A
<i>EPE</i>	Empresa de pesquisa energética
<i>ETC</i>	Coletor solar de tubos a vácuo
<i>FORTTRAN</i>	Linguagem de programação da IBM – mathematical FORMula TRANslation system
<i>FPC</i>	Coletor solar de placa plana
<i>IEA SHC</i>	Programa de aquecimento e refrigeração da agencia internacional de energia
<i>MG</i>	Estado de Minas Gerais
<i>ONG</i>	Organização não governamental
<i>PROCEL</i>	Programa nacional de conservação de energia elétrica
<i>RCF</i>	Coeficiente avaliativo do uso de recursos renováveis

<i>REN21</i>	Rede de políticas de energias renováveis para o século 21
<i>SEE</i>	Superintendência de estudos econômicos e energéticos
<i>SONDA</i>	Sistema de organização nacional de dados ambientais
<i>SWERA</i>	Programa de avaliação dos recursos de energia eólica e solar
<i>UFMG</i>	Universidade Federal de Minas Gerais
<i>UFRGS</i>	Universidade Federal de Rio Grande do Sul
<i>WC</i>	Banheiro

### **Letras Gregas**

		<b>Unidade</b>
$\alpha$	Absortância ou poder de absorção	
$\beta$	Declive	[°]
$\delta$	Inclinação	[°]
$\varepsilon$	Emitância	[W m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> ]
$\theta$	Ângulo, ângulo entre a superfície normal e a radiação incidente	[°]
$\rho$	Refletância	
$\tau$	Transmitância	
$\varphi$	Latitude	[°]
$\omega$	Ângulo horário	[°]

### **Letras Latinas**

		<b>Unidade</b>
<i>A</i>	Área, altitude	[m <sup>2</sup> ou m]
<i>C<sub>p</sub></i>	Calor específico	[kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
<i>e</i>	Poder emissivo	[W m <sup>-2</sup> ]

$F_R$	Fator de remoção de calor do coletor solar	
$f$	Fator de modulação	
$G_{sc}$	Constante solar	[W m <sup>-2</sup> ]
$g$	Constante gravitacional	[m s <sup>-2</sup> ]
$H$	Irradiação diária	[MJ m <sup>-2</sup> ]
$h_w$	Coefficiente de transferência de calor para o vento	[W m <sup>-2</sup> K]
$I$	Radiação horária	[MJ m <sup>-2</sup> ]
$I_R$	Índice de refração	
$K$	Coefficiente de extinção	[m <sup>-1</sup> ]
$k$	Condutividade térmica	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$K_T$ ou $k_t$	Índice horário de claridade	
$L$	Longitude	[m]
$\dot{m}$	Fluxo mássico	[kg s <sup>-1</sup> ]
$n$	Dia do ano	
$N$	Número de coberturas de vidro, número de horas	
$P$	Potência, perímetro	[W ou m]
$Q$	Taxa de calor	[W]
$Q_H$	Energia da fonte quente	[W]
$Q_L$	Energia da fonte fria	[W]
$r$	Índice de reflexão	
$R$	Resistência	[Ω]

$R_B$	Taxa de radiação direta sobre o plano inclinado	
$S$	Radiação solar absorvida por unidade de área	[MJ m <sup>-2</sup> ]
$t$	Tempo, espessura	[s ou m]
$T$	Temperatura	[K]
$U_b$	Perdas de energia na base do coletor	[W]
$U_e$	Perdas de energia na lateral do coletor	[W]
$U_L$	Perdas totais de energia no coletor	[W]
$U_T$	Perdas de energia na superfície superior do coletor	[W]
$V$	Tensão	[V]
$W_C$	Trabalho de compressor	[kW]
$x$	comprimento	[m]
$Z$	Variável de computação	

#### Subscritos

$a$	Ambiente, absorvida
$b$	Direta
$c$	Coletor
$d$	Difusa
$f$	Fluido
$g$	Solo
$i$	Entrada
$l$	Lateral

<i>m</i>	Média
<i>n</i>	Normal
<i>o</i>	Saída, global
<i>p</i>	Placa
<i>r</i>	Radiação
<i>T</i>	Sobre um plano inclinado
<i>u</i>	Útil
<i>w</i>	Água
<i>x</i>	Cumpre-se para d, g e b.
<i>z</i>	Zênite
$\perp$	Perpendicular
$\parallel$	Paralelo

# 1. INTRODUÇÃO

A demanda de energia é cada vez maior devido ao crescimento da população mundial e à procura por melhores padrões de vida pelas pessoas. No entanto, os combustíveis fósseis, a principal fonte de energia atual, estão sendo consumidos de forma indiscriminada cada vez que a população aumenta, mesmo sabendo que eles não são renováveis e a sua quantidade global é limitada (Owen, Inderwildi e King, 2010). Consequentemente, a poluição e o aquecimento global crescem em uma forma alarmante. Motivados por estes fatos, as ONG's estão trabalhando para aumentar a participação de fontes renováveis de energia e, assim, reduzir o consumo de energia no mundo, o que contribuirá para reduzir os problemas supracitados (Ibrahim *et al.*, 2014b).

A necessidade da substituição das fontes não renováveis por fontes renováveis é um assunto que tem motivado o investimento em programas de eficiência energética. O consumo mundial de energia é composto por 84,1% de fontes de energia não renováveis, contra somente 15,9% de fontes renováveis, segundo dados do Key World Energy Statistics do ano de 2014 (Iea, 2014).

No GRA. 1.1 detalha-se as fontes de energia utilizadas na matriz energética mundial e a sua respectiva participação em termos percentuais.

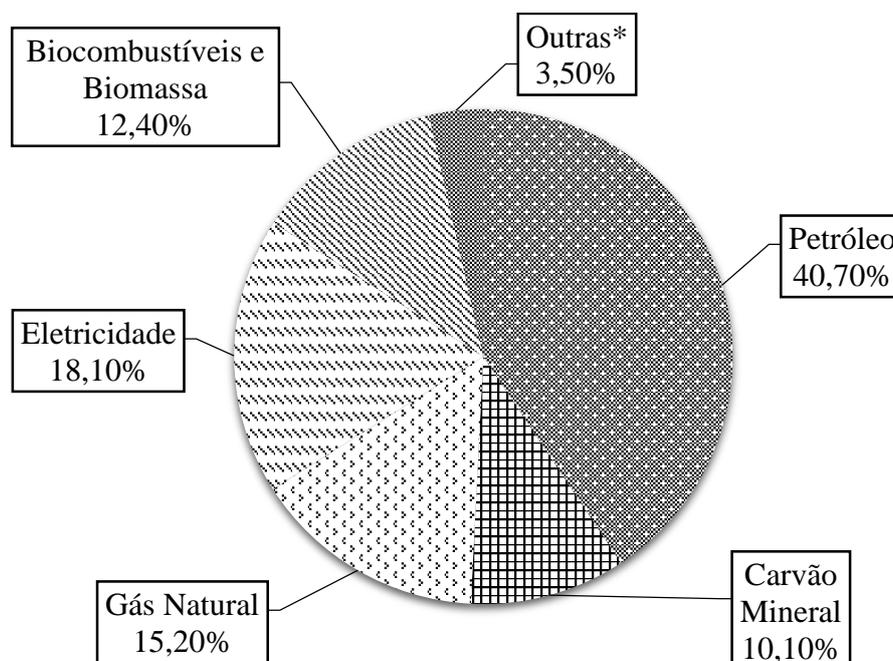


GRÁFICO 1.1 – Fontes de energia utilizadas na matriz energética mundial. \*Inclui geotérmica, solar, eólica, etc.

FONTE – IEA (2014), p. 28

Por outra parte, uma boa parcela da energia produzida no mundo é gasta no aquecimento de água. Esta parcela no consumo residencial é cerca de 11% nos Estados Unidos da América (Levine *et al.*, 2007), 14% na Europa (Ademe, 2009), 22% no Canadá (Aguilar, White e Ryan, 2005), 25% na Austrália (Government, 2013), 29% no México (Rosas-Flores, Rosas-Flores e Gálvez, 2011), 27% na China (Zhou *et al.*, 2008), 32% na África do Sul (Accounts, 2005).

No Brasil, segundo a empresa de pesquisa energética (Epe, 2014), a participação de energias renováveis na matriz energética manteve-se entre as mais elevadas do mundo e várias ações têm sido feitas para o desenvolvimento e aproveitamento de fontes alternativas, entre elas a energia solar, utilizada especialmente para aquecimento de água. De acordo com a pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso da classe residencial realizada pelo programa nacional de conservação de energia elétrica – PROCEL (2007) e ilustrado no GRA. 1.2, o equipamento com maior participação no consumo final de energia elétrica na classe residencial é o chuveiro elétrico, representando 24% do consumo (Santos *et al.*, 2011).

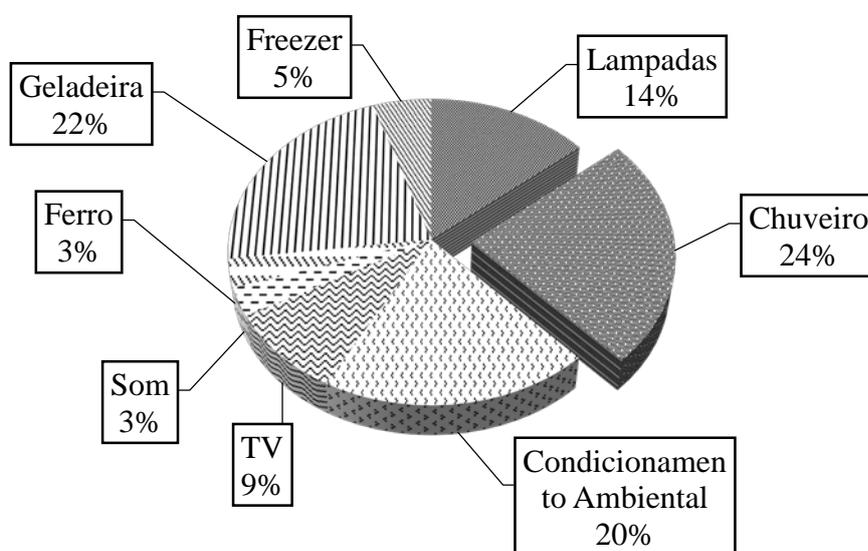


GRÁFICO 1.2 – Consumo final na carga residencial no Brasil.

FONTE – Procel e Eletrobras (2007), p. 15

Segundo EPE (Epe, 2012), o chuveiro elétrico encontra-se em 73,1% das residências do Brasil, e é responsável por 43% do consumo de energia em uma residência padrão na época de inverno no hemisfério sul (GRA. 1.3). Aliás, o chuveiro elétrico não tem direito a um selo da instituição encarregada de qualificar a eficiência dos eletrodomésticos, diferente do restante, porque não melhora a eficiência no decorrer dos anos. Ou seja, vai ter um consumo de energia que excederá cada vez mais o consumo energético apresentado pelos seus

concorrentes. Além disso, é importante saber que nas regiões sul e sudeste o uso do chuveiro atinge quase que a totalidade das residências, 98,60% e 90,70% respectivamente.

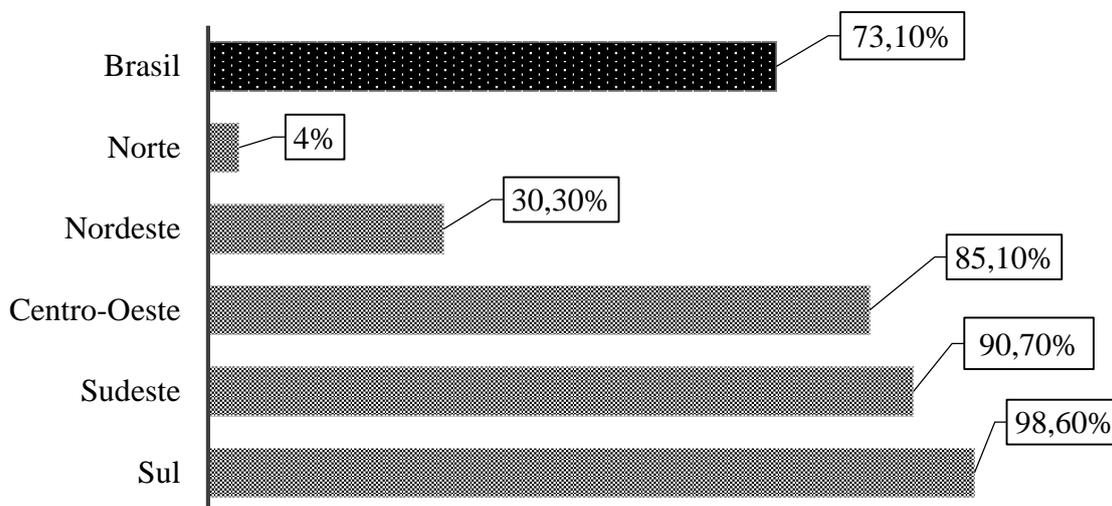


GRÁFICO 1.3 – Domicílios que possuem pelo menos um chuveiro elétrico no Brasil e regiões.

FONTE – PROCEL e Eletrobrás (2007), p. 49

O problema do chuveiro não é apenas a quantidade de energia consumida, mas também o horário de uso. Estes aparelhos são normalmente ligados ao mesmo tempo, entre 18h e 21h. Neste momento, o sistema elétrico nacional fica sobrecarregado e as distribuidoras são obrigadas a comprar energia para satisfazer toda a demanda. No mercado, quem vende estes excedentes são as termelétricas, a um preço mais alto.

Como forma de reduzir este consumo de energia elétrica e contribuir no uso de fontes alternativas de energia, vem-se utilizando dispositivos aproveitadores da energia solar para aquecimento de água para uso doméstico. Porém, uma restrição ao uso isolado desses sistemas é a falta de dias ensolarados ao longo do ano. As cartas da radiação solar global mostram que no estado de Minas Gerais a radiação solar varia entre 3,0 e 7,5 kWhm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, em que as estações solarimétricas registram uma intensidade na faixa de 3,0 a 4,0 kWhm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (Cemig, 2011). Em função desse aspecto, torna-se necessário realizar trabalhos de pesquisa buscando encontrar um sistema (sistema de aquecimento solar e sistema de apoio) para aquecimento de água que funcione satisfatoriamente nos dias de baixa incidência solar. Porém, o objetivo deste trabalho é caracterizar o funcionamento de uma bomba de calor (BDC) com evaporador estático como dispositivo de apoio a um coletor solar sob condições reais de radiação solar. Para levar a cabo este objetivo, é necessário desenvolver dois algoritmos computacionais que permitam simular a radiação incidente em uma placa coletora e a demanda de água quente de uma casa padrão. O

conjunto coletor solar e BDC será exposto às diferentes condições de radiação solar com a finalidade de caracterizar o funcionamento dele. Este conjunto será utilizado como sistema auxiliar sempre que a energia solar não for suficiente para aquecer a água, seja porque há uma grande demanda de água quente ou uma deficiência de insolação. Visa-se com o primeiro algoritmo determinar a relação entre a energia solar incidente no plano coletor e a quantidade equivalente de potência que deve ser fornecida pela resistência elétrica. A variação na potência é obtida pela modulação da tensão que alimenta o conjunto de resistências elétricas. Com esta modulação é possível simular a potência equivalente que seria obtida com perfis típicos de insolação ao longo de um dia. O segundo algoritmo é necessário para simular o perfil de demanda de água quente ao longo de um dia para uma casa padrão.

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução, o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre conceitos gerais de energia, economia sustentável, mercado de sistemas e dispositivos solares, sistemas de aquecimento de água para uso residencial com coletor solar e BDC, modelagem e simulação de recursos solares. O Capítulo 3 destina-se à metodologia. Neste capítulo encontra-se a descrição do objeto de estudo, a coleta dos dados solarimétricos e de consumo de água, a elaboração do primeiro e segundo algoritmo computacional e do algoritmo auxiliar, o cálculo da máxima potência elétrica necessária para simulação da radiação solar e o método de ensaio. No Capítulo 4 detalha-se a análise dos dados coletados e os dados obtidos com os ensaios experimentais, bem como descreve-se os resultados da simulação do equipamento. O capítulo 5 destina-se às conclusões da dissertação e recomendações para trabalhos futuros.



placa plana (FPC): 65,4 GW, coletores de tubo de vácuo (ETC): 146,1 GW, coletores sem cobertura: 21,5 GW e coletores a ar cobertos e não cobertos: 1,5 GW.

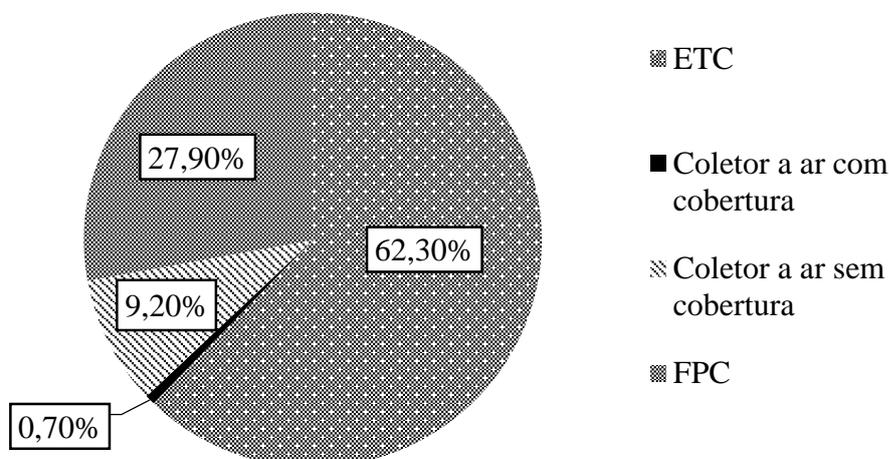


GRÁFICO 2.1 – Distribuição do total da capacidade instalada em operação por tipo de coletor em 2011.

FONTE – MAUTHNER e WEISS (2013), p. 11

De acordo com a FIG. 2.2, a tecnologia mais usada no Brasil para o aquecimento de água é o coletor de placa plana, onde quase 4 GW são proporcionados por este tipo de tecnologia.

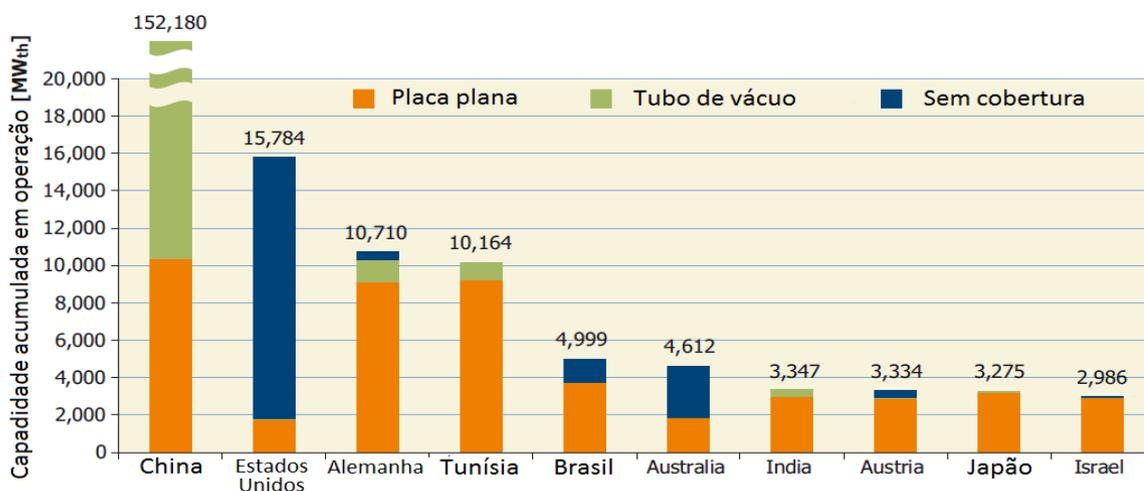


FIGURA 2.2 – Capacidade total de coletores de aquecimento de água em operação nos 10 principais países até o ano 2011.

FONTE – MAUTHNER e WEISS (2013), p. 11

## 2.2 O uso da energia solar para o aquecimento de água no Brasil.

Apesar do enorme potencial de aproveitamento da energia solar, devido ao seu alto nível de insolação, apenas 3,6% das residências utiliza sistemas de aquecimento solar (Epe, 2012). Os sistemas de aquecimento solar trariam benefícios para o sistema distribuição de

energia, pois contribuiriam para reduzir o consumo de energia elétrica de forma expressiva e também contribuiriam para reduzir a carga no sistema de fornecimento nos horários de pico; 24% de toda a energia consumida nas residências brasileiras é consumida pelo sistema de aquecimento elétrico (Eletrobras e Procel, 2013).

Em 2012 foram instalados no Brasil 1,143 milhão de m<sup>2</sup> de coletores solares e 343 mil reservatórios térmicos. Esses sistemas serviram para obter economias de energia e redução na demanda de ponta. Cabe destacar que desse 1,143 milhão de m<sup>2</sup> de coletores solares instalados, 1,028 milhão correspondem a aquecimento solar para banho (Eletrobras e Procel, 2013).

A economia de energia elétrica proporcionada pela utilização dos coletores solares foi de 36,61 GW e a redução na demanda de ponta chegou a 492,13 MW. O GRA. 2.2 mostra a divisão regional da economia de energia devida aos coletores solares com selo Procel – Eletrobras em 2012.

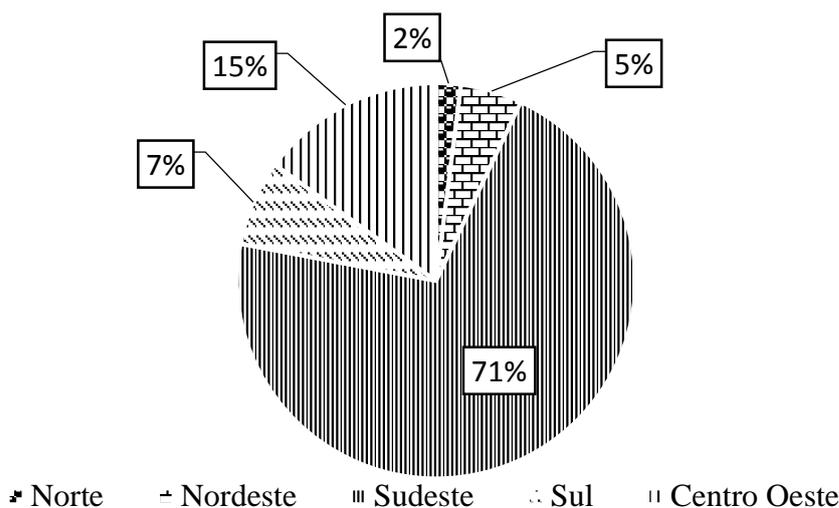


GRÁFICO 2.2 – Distribuição regional da energia economizada pelos coletores solares com selo Procel em 2012 por região geográfica.

FONTE – ELETROBRAS e PROCEL (2013), p. 46.

### 2.3 Mercado consumidor de energia elétrica no setor residencial no Brasil.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE e detalhado no GRA. 2.3, no ano 2013 o consumo médio da energia na região sudeste no período do ano 2004 a outubro do 2013 foi 207.295.378 MW, distribuído entre os setores residencial, industrial, comercial e outros (rural, serviço público e iluminação pública). O setor residencial, o qual é o foco desta dissertação, contribuiu com uma média de 47.294.621 MW. Os dados são atualizados pela

Superintendência de estudos Econômicos e Energéticos – SEE e da Diretoria de estudos Econômico-energéticos e Ambientais – DEA.

Como este projeto está voltado para o aquecimento de água usando energia elétrica, será trabalhado o consumo de energia elétrica relacionado ao aquecimento de água. O GRA. 2.3 ilustra a redução que poderia ser obtida (aprox. 5,3% no consumo total), caso a energia utilizada pelo chuveiro fosse retirada da demanda residencial no Brasil.

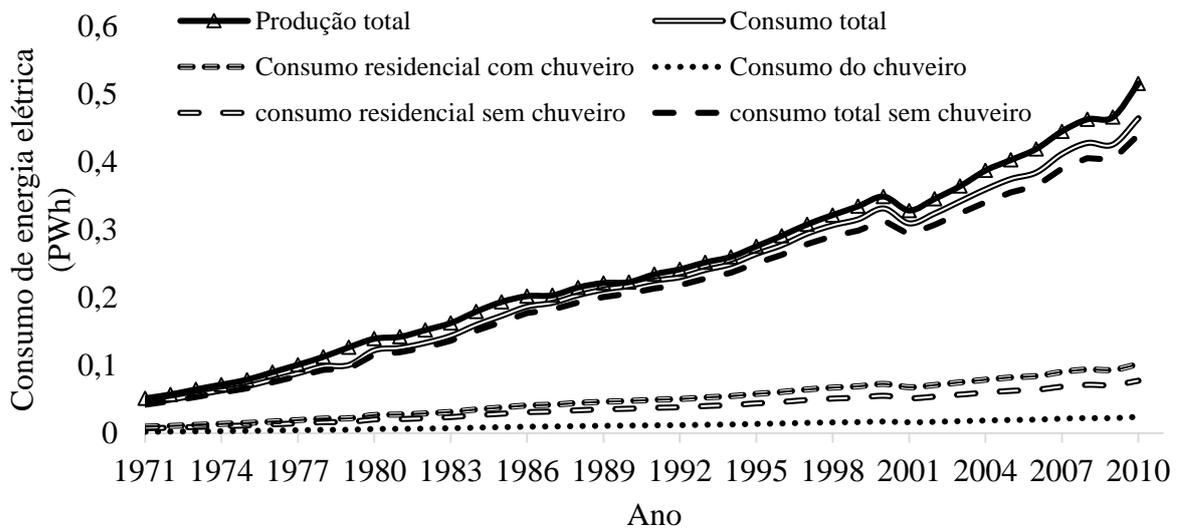


GRÁFICO 2.3 – Indicadores de desenvolvimento em energia elétrica do Brasil ano 1971 até 2010, consumo de energia elétrica subtraindo o uso de chuveiros elétricos.

FONTE – BANK (2013). Site web: <http://data.worldbank.org/country/brazil>

#### 2.4 Disponibilidade e utilização da energia solar no Brasil.

Com uma média anual de aproximadamente 280 dias de sol e 15 trilhões de MW de energia solar incidentes no ano, o Brasil possui um enorme potencial para o desenvolvimento do mercado de sistemas compostos para aquecimento solar de água (Rodrigues e Matajs, 2004).

O mapa da FIG. 2.3 apresenta a distribuição da radiação solar global diária média anual em um plano horizontal. Apesar das diferentes características de clima ao longo do território brasileiro, observa-se que a irradiação global é bastante uniforme. A média anual de irradiação global horizontal diária solar, em qualquer região do Brasil ( $1,5$  a  $2,5 \text{ kWm}^{-2}$ ) é maior que as da maioria dos países europeus, como a Alemanha ( $0,9$  a  $1,25 \text{ kWm}^{-2}$ ), a França ( $0,9$  a  $1,65 \text{ kWm}^{-2}$ ) e a Espanha ( $1,2$  a  $1,85 \text{ kWm}^{-2}$ ), onde projetos de aproveitamento dos recursos solares são muito difundidos, alguns dos quais, com grandes incentivos do governo (Martins, Abreu e Pereira, 2012).

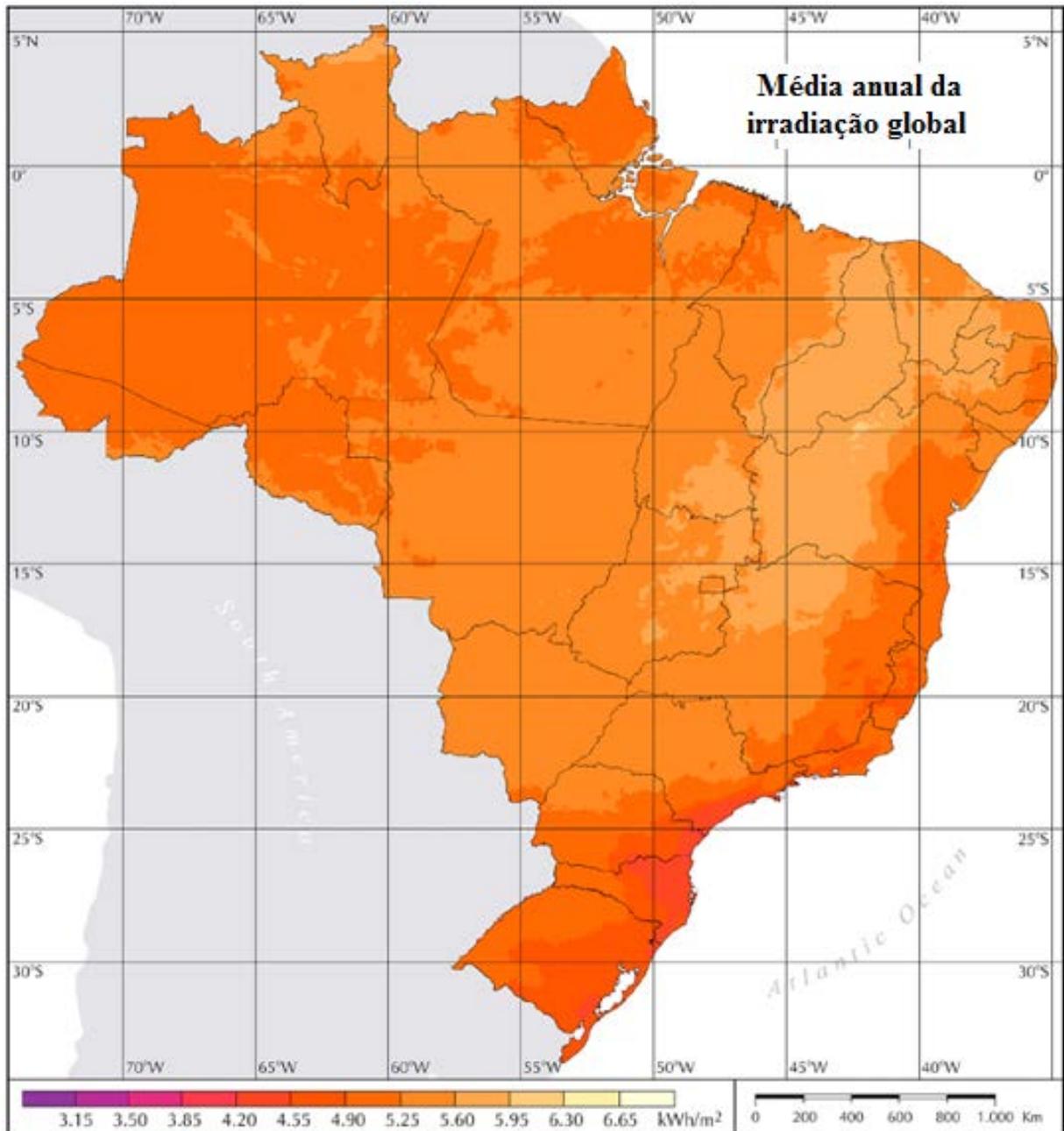


FIGURA 2.3 – Distribuição da radiação diária global média anual total na horizontal para o Brasil.

FONTE – PEREIRA e LIMA (2008), p. 45

## 2.5 Características físicas associadas ao uso da energia solar.

### 2.5.1 A constante solar.

A constante solar  $G_{sc}$  é definida por Duffie e Beckman (2013) como a energia por unidade de tempo emitida pelo sol e recebida por uma unidade de área de uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação situada fora da atmosfera terrestre e possui um valor constante de  $1,367 \text{ kWm}^{-2}$ .

### 2.5.2 A atenuação da radiação solar pela atmosfera.

A interação da radiação solar extraterrestre com a atmosfera provoca reações de absorção e espalhamento de fótons com os constituintes da atmosfera. Na FIG. 2.4 estão ilustradas esquematicamente as reações de espalhamento e absorção na atmosfera e, como resultado, a desagregação da radiação solar em componentes de radiação direta e radiação difusa, entendendo como difusa a radiação solar que sofre um ou mais processos de espalhamento.

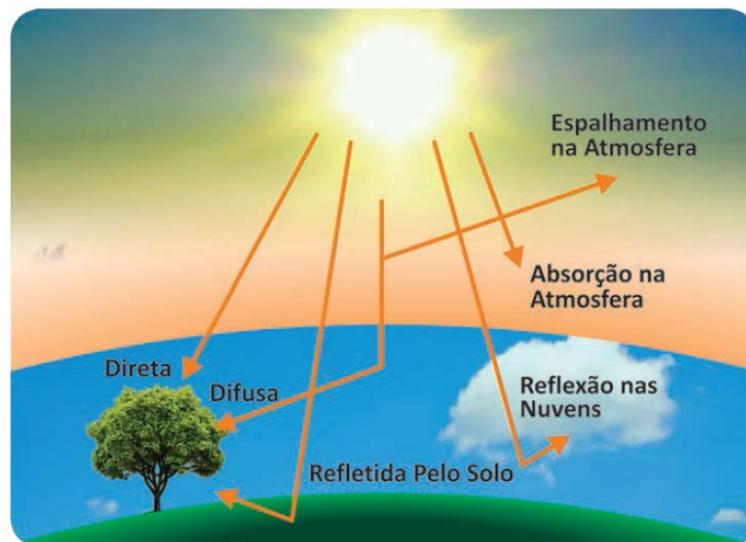


FIGURA 2.4 – Componentes direta e difusa da radiação solar na superfície terrestre.

FONTE – CEMIG (2011), p. 28

### 2.5.3 Os ângulos de incidência da radiação solar.

O movimento relativo entre o sol e a terra tem influência direta no posicionamento dos coletores solares. A inclinação e a orientação do sistema dependem da localização geográfica da instalação. Alguns dos ângulos estão indicados na FIG. 2.5a (Goswami, Kreith e Kreider, 2000; Duffie e Beckman, 2013).

✓ Latitude ( $\phi$ ): É a coordenada geográfica definida na superfície terrestre. Ela representa o ângulo entre o plano do equador e a normal à superfície de referência;  $-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$ , sendo positiva para o norte e negativa para o sul do equador.

✓ Declinação solar ( $\delta$ ). É a posição angular do sol ao médio dia solar (i.e., quando o sol atinge sobre o meridiano local) com respeito ao plano do equador, positiva para o norte;  $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$ . A declinação solar para cada dia do ano pode ser calculada através da EQ. (2.1).

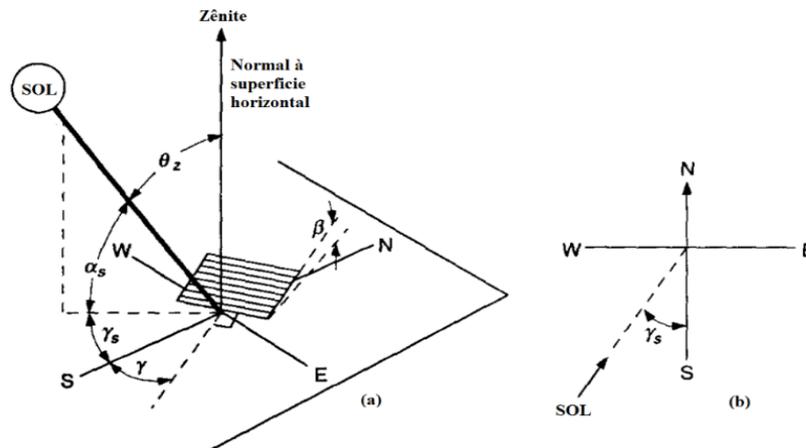


FIGURA 2.5 – (a) Ângulo zênite, declive, ângulo de azimute com respeito à superfície, e ângulo de azimute solar de acordo com a inclinação da superfície. (b) Plano visto desde o teto ilustrando o ângulo de azimute solar.

FONTE – DUFFIE e BECKMAN (2013), p. 13

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Onde  $n$  corresponde ao dia do ano e varia de 1 a 365, sendo  $n = 1$  quando corresponde ao dia 1 de janeiro.

✓ Declive ( $\beta$ ): É o ângulo entre o plano da superfície relacionada e a horizontal;  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ . ( $\beta > 90^\circ$  significa que a superfície do coletor está virada para baixo).

✓ Ângulo horário ( $\omega$ ): O deslocamento angular do sol de leste ao oeste do meridiano local, devido à rotação da Terra sobre seu eixo, 15 graus por hora; manhã negativa e tarde positiva.

✓ Ângulo de incidência ( $\theta$ ): É o ângulo entre a radiação direta sobre uma superfície e a normal dessa superfície.

## 2.6 Trabalhos similares desenvolvidos por outros autores.

Nesta seção serão apresentados alguns dos estudos realizados por outros pesquisadores que são relevantes na área de pesquisa deste trabalho. Os trabalhos são organizados de ordem cronológica e por temas de interesse.

### 2.6.1 Coletores de placa plana e bombas de calor como sistemas de apoio aos dispositivos solares de aquecimento de água.

Comakli, Bayramoglu e Kaygusuz (1996) modelaram termodinamicamente um conjunto coletor solar e BDC que utilizava a energia disponibilizada pelo sol como fonte

principal para o melhoramento do coeficiente de performance da BDC. O modelo desenvolvido foi baseado no equipamento piloto da FIG 2.6 e consistiu no uso de correlações aplicadas no coletor solar, no tanque de armazenamento de energia, no compressor, no condensador e no evaporador. A principal justificativa da pesquisa foi a problemática que vivia-se na Turquia, onde a maior parte da energia elétrica – 42% do consumo total no setor residencial – era usada para o aquecimento doméstico de ar e de água. A pesquisa focou-se na realização de simulações para avaliar a importância do desenho estrutural sobre o desempenho e economia do sistema. Além disso, o estudo demonstrou um COP alto. Apesar de que este coeficiente de performance podia ser aumentado usando um maior número de coletores solares, o custo do investimento inicial sofria um maior aumento, tornando o projeto inviável.

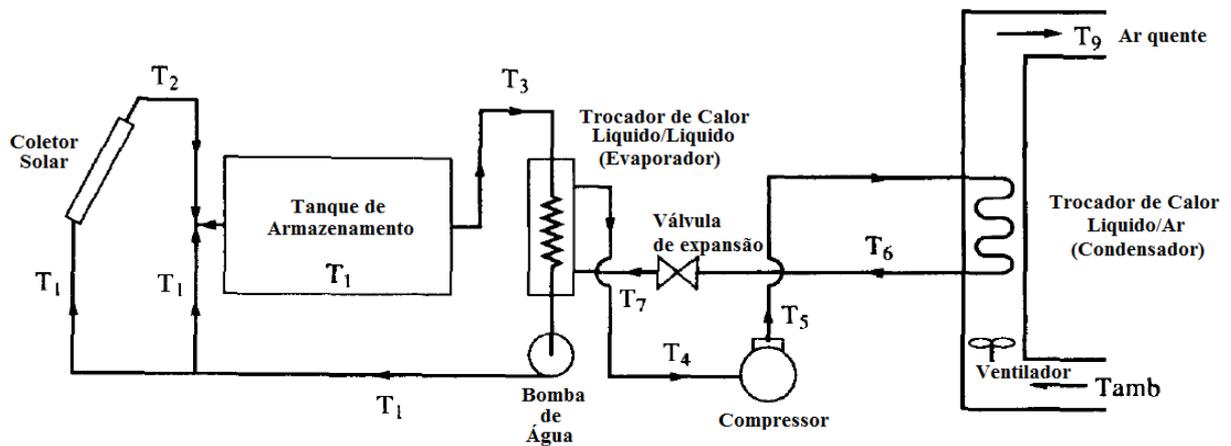


FIGURA 2.6 – Representação esquemática do sistema utilizado.

FONTE – Adaptação de COMAKLI, BAYRAMOGLU e KAYGUSUZ (1996), p. 486

Hawlader, Chou e Ullah (2001) apresentaram estudos analíticos e experimentais do COP de uma BDC assistida por energia solar para o aquecimento de água, onde coletores solares de placa plana sem cobertura de vidro, atuaram como evaporador no ciclo de refrigeração do fluido R-134a. Os autores demonstraram que os resultados obtidos na simulação podem ser usados na otimização estrutural do equipamento, com a finalidade de determinar o trabalho ótimo do compressor, a radiação mínima necessária e a energia auxiliar requerida para exercer a aplicação.

Conhecendo a importância da participação dos coletores solares na energia térmica, Kalogirou (2004) analisou uma extensa bibliografia sobre as principais configurações e aplicações deste tipo de equipamento. Nessa revisão, fez-se uma descrição dos vários tipos de coletores, incluindo o coletor de placa plana.

Li et al. (2007) analisaram uma configuração experimental ilustrada na FIG. 2.7. Nela observa-se um coletor solar assistido com uma BDC para aquecimento de água. O

protótipo consistiu principalmente de  $4,2 \text{ m}^2$  de superfície coletora com expansão direta tipo coletor/evaporador, um compressor hermético trabalhando com fluido R-22, um tanque de armazenamento de água com capacidade de 150 l. O protótipo também tinha 60 m de serpentina de cobre imersa no tanque e válvula de expansão termostática. Os resultados mostraram que o COP do sistema podia chegar a 6,61 quando a temperatura média da água aquecida mudava de  $13,4^\circ\text{C}$  a  $50,5^\circ\text{C}$ . Ainda assim, os autores debateram sobre a ótima eficiência do equipamento onde em uma noite com chuva e temperatura ambiente inferior a  $17,1^\circ\text{C}$ , o COP do sistema foi de 3,11.

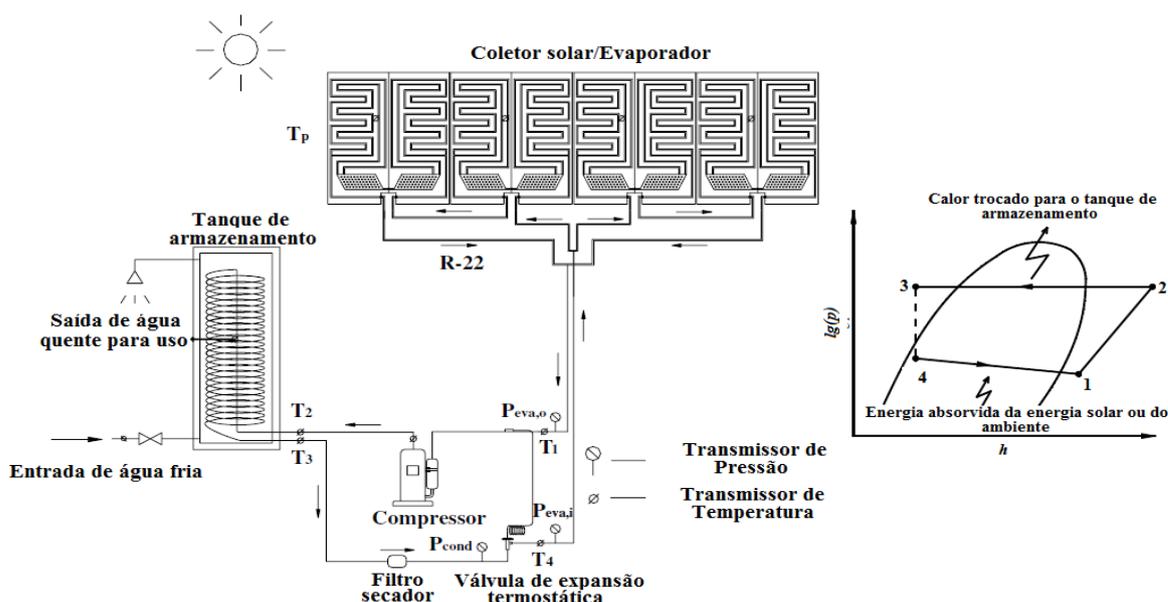


FIGURA 2.7 – Esquema do sistema avaliado no trabalho de Liu et al (2007).

FONTE – Adaptação de LI et al., (2007), p. 2860

Scarpa, Tagliafico e Tagliafico (2011), compararam um sistema de BDC com coletor/evaporador e um sistema de aquecimento padrão de coletor de placa plana para aquecimento de água de baixa temperatura ( $45^\circ\text{C}$ ). A comparação (simulada) foi realizada assumindo que ambos dos dispositivos contribuiriam fornecendo energia principal e o dispositivo auxiliar era um queimador de gás. No artigo, destaca-se novos conceitos de controle da BDC, que são necessários quando o objetivo principal do protótipo é a máxima economia de energia para determinada demanda dos usuários. A FIG. 2.8 apresenta os dois sistemas estudados, sendo a parte A o sistema tradicional do painel solar térmico assistido com aquecedor a gás de passagem e a parte B contempla o sistema de aquecimento do fluido refrigerante pelo painel solar e compressor proporcionando o aquecimento da água no interior do reservatório.

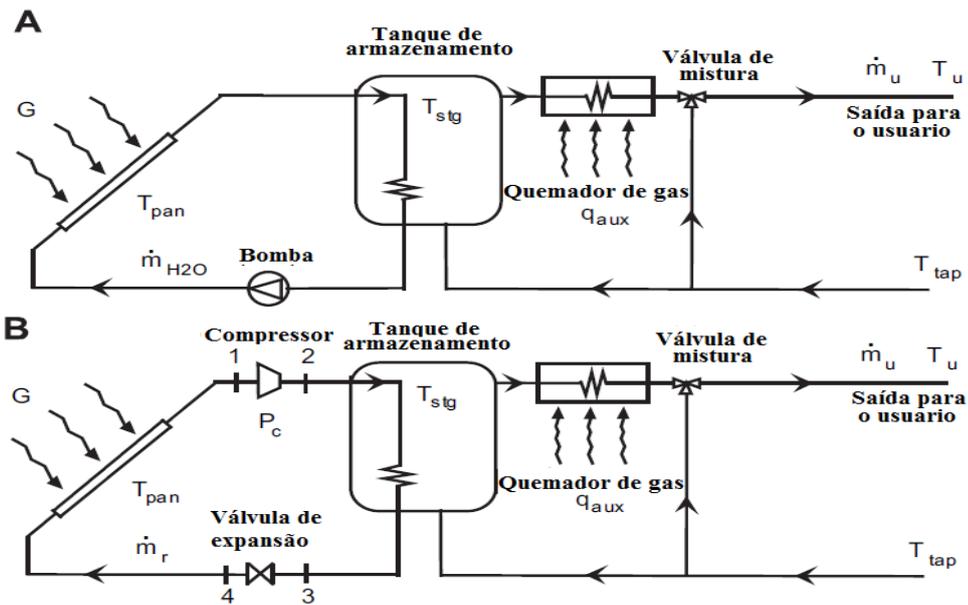


FIGURA 2.8 – Esquema simplificado de uma montagem de painel solar com dispositivos auxiliares. (A) Painel solar térmico. (B) O sistema de água foi substituído por um sistema de compressão de vapor refrigerante.

FONTE – Adaptação de SCARPA, TAGLIAFICO e TAGLIAFICO (2011), p. 60

Fernández-Seara et al. (2012) avaliou experimentalmente o desempenho de uma BDC assistida com expansão solar direta para aquecimento de água. Os autores fizeram a avaliação do protótipo sob condições de zero radiação solar e operação de aquecimento estático no tanque de armazenamento. A característica de radiação solar zero foi atingida mediante o traslado do equipamento a uma sala fechada climatizada que permitia manter a temperatura igual à temperatura ambiente do lugar. O trabalho concluiu que mesmo sob essas condições, o equipamento avaliado teve uma média de desempenho igual a 3,23 e o seu comportamento é fortemente determinado pela temperatura da água e a temperatura do ambiente como pode-se observar na FIG. 2.9.

De Melo Reis et al. (2012) apresentou uma técnica alternativa para a redução do consumo de energia eléctrica através da utilização de um sistema de energia solar em conjunto com uma BDC para aquecimento de água doméstica. A pesquisa demonstrou um COP médio igual a 2,10, valor baixo devido ao uso de um compressor alternativo hermético e ao uso de um evaporador convencional de ventilação forçada. Por outro lado, apesar do protótipo ter baixo coeficiente de performance, o seu investimento é moderado, o qual faz que o projeto permita um retorno entre 2,1 - 3,3 anos, enquanto o equipamento tem uma vida útil de cerca de 20 anos, este período de retorno do investimento é interessante.

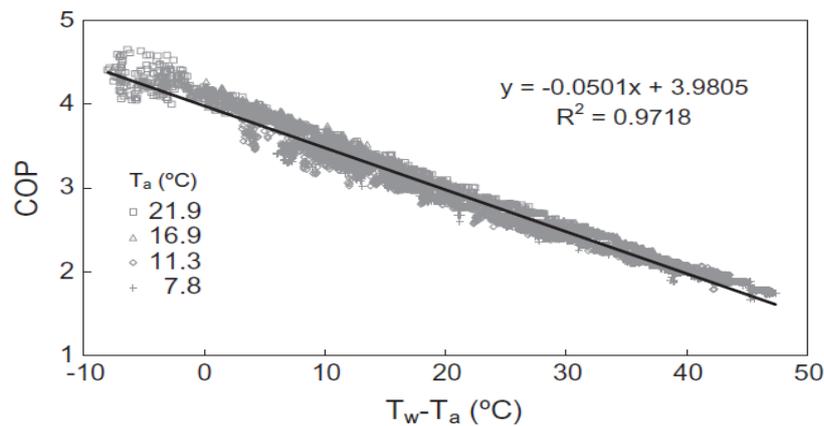


FIGURA 2.9 – Comportamento do COP como uma função da diferença entre a temperatura da água e a temperatura do ar ambiente.

FONTE – FERNÁNDEZ-SEARA et al., (2012), p. 7

Rahman, Saidur e Hawlader (2013) apresentaram uma metodologia de simulação dos parâmetros de funcionamento de um sistema compacto de secagem solar. O sistema estava composto por um coletor solar de ar assistido por uma BDC. A viabilidade econômica de sistemas de aquecimento solar é geralmente feita através da comparação dos fluxos de custos recorrentes ao longo do tempo de vida dos sistemas alternativos solares e convencionais. Portanto, a identificação de variáveis ótimas usando um programa de simulação e uma análise econômica com base no período de recuperação do investimento são apresentados nesse trabalho. A análise econômica revelou que regularmente este tipo de sistemas têm quantidade suficiente de poupança durante todo o ciclo de vida, em alguns dos casos, período mínimo de retorno do investimento de 4 anos.

Ibrahim, O. et al (2014a) apresentaram o estudo de um sistema de aquecimento híbrido de água. O sistema estava composto por um coletor solar, um aquecedor de água usando uma BDC, o uso de uma turbina eólica, uma bateria e um tanque de armazenamento de água quente. Os autores pesquisaram sobre o impacto de duas configurações de BDC no funcionamento do conjunto. Na primeira tinha-se um evaporador a ar e na segunda um evaporador a líquido onde aproveitava-se a energia geotérmica da localidade. Simulações para os dias típicos de verão e inverno para duas cidades libanesas com diferentes condições meteorológicas e demográficas foram realizadas utilizando o software MATLAB. Os resultados revelaram que o sistema híbrido proposto é capaz de assegurar todas as necessidades de água quente em todos os estudos de caso, onde o coeficiente RCF foi sempre superior a 63%. Os autores destacaram o uso da modelagem das condições meteorológicas como uma ferramenta importante ao determinar os comportamentos dos equipamentos.

Zhang et al. (2014) estudaram o desempenho socioeconômico de um equipamento solar, onde células fotovoltaicas trabalham em conjunto com uma BDC como sistema de aquecimento térmico para testar a sua aplicação em três regiões climáticas diferentes, ou seja, a área fria representada por Londres, a área quente representada por Xangai e a área subtropical representada por Hong Kong. Nessa pesquisa, o foco foi a simulação do protótipo baixo as diferentes condições meteorológicas, já que, tendo uma maior radiação solar o painel fotovoltaico permitia o aproveitamento da energia solar para o acionamento da BDC, e, por conseguinte, o aumento do COP da BDC.

Por último, Chaturvedi, Gagrani e Abdel-Salam (2014) afirmaram que os sistemas de BDC com expansão solar direta têm sido amplamente utilizados, incluindo aquecimento de água. Este trabalho caracteriza-se por envolver um longo prazo de análise termo-econômica do potencial de conservação de energia e viabilidade desses sistemas. O desempenho térmico foi simulado incorporando a localização e radiação incidente no coletor. Os resultados indicaram que os sistemas de aquecimento solar são mais econômicos quando são comparados com os aquecedores elétricos convencionais, tendo como ponto importante a conservação de energia. A análise revela que o valor mínimo do custo do ciclo de vida do sistema é obtido através de valores ótimos da área coletora solar, bem como a capacidade de deslocamento do compressor.

#### 2.6.2 Simulação de modelos solares, variabilidade das constantes solares, uso de dados obtidos por satélites geoestacionários e estimativas de radiação solar.

Martins, Pereira e Echer (2004) e Martins et al. (2005) apresentaram os resultados obtidos pelo projeto SWERA no mapeamento dos recursos de energia solar para o território brasileiro. O artigo discute a metodologia empregada para a produção de mapas solarimétricos e para determinação da confiabilidade dos resultados. Os resultados mostraram que, mesmo nos estados da região sul do país, a média anual da disponibilidade de energia solar no Brasil é superior à verificada em países europeus, como a Alemanha, a Espanha e a França, onde a exploração dessa fonte de energia vem sendo realizada de forma crescente nos últimos anos.

Guedes et al. (2006) realizaram um estudo para obtenção de estimativas da componente difusa da irradiação solar a partir dos índices  $K_T$ ,  $K_d$  e  $K$  obtidos a partir de dados coletados em superfície. O estudo foi baseado em dados coletados na estação do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – SONDA em operação no Observatório Espacial do Sul (29,4°S; 53,8°O) em São Martinho da Serra. Na primeira etapa da pesquisa, realizou-se uma avaliação do comportamento de dos modelos empíricos. Como resultado do trabalho, o

modelo SMS, que foi um novo modelo empírico desenvolvido pelos autores a partir de dados coletados na mesma estação, apresentou um melhor desempenho na estimativa de K.

De Souza Echer, Martins e Pereira (2006) fizeram uma revisão dos aspectos ligados à influência das nuvens sobre o clima, mesmo o seus impactos no desenvolvimento científico, tecnológico e econômico de diversos setores da atividade humana. Também foram apresentadas as metodologias mais modernas para a determinação da cobertura de nuvens a partir de medidas feitas na superfície e por satélite. Segundo a FIG 2.10, os autores demonstraram a influência da cobertura das nuvens na quantidade de radiação total.

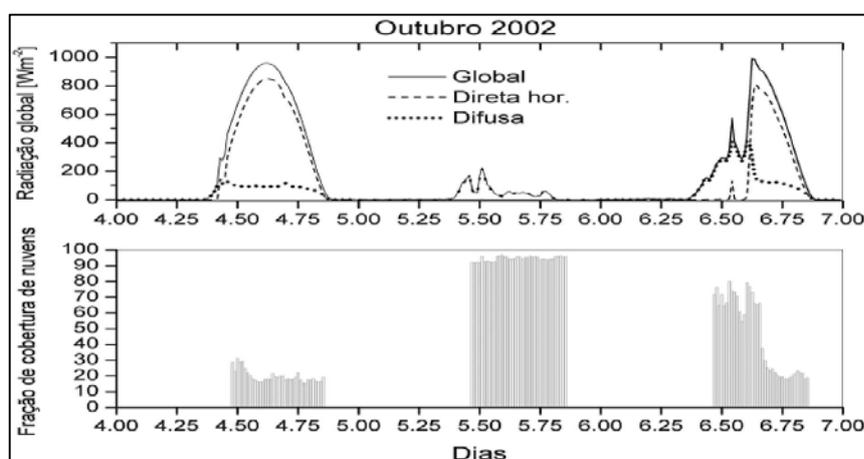


FIGURA 2.10 – O gráfico superior apresenta a radiação global, difusa e direta para os dias 4, 5 e 6 de Outubro de 2002. O Gráfico inferior apresenta fração da cobertura de nuvens para o mesmo período observado com o imaginador desenvolvido na DMA/C.

FONTE – De Souza Echer, Martins e Pereira (2006), p. 351

Brackmann et al. (2008) observaram a necessidade de obter informações sobre a disponibilidade e variabilidade dos recursos de energia solar para garantir a sua aplicação como uma possível solução para os problemas energéticos de hoje em dia. A sua pesquisa baseou-se no desenvolvimento de modelos energéticos para estimar parâmetros solares usando medições terrestres confiáveis. O trabalho teve como objetivo desenvolver e validar quatro modelos empíricos (PI, IPI, GI, GII) para fornecer estimativas instantâneas e diárias da radiação solar.

Rodríguez-Hidalgo et al. (2011) realizaram uma pesquisa experimental para descrever o comportamento transitório de um campo de coletores de placa plana em condições de trabalho ao ar livre. O modelamento do transitório foi desenvolvido com o uso de resistências térmicas e capacitâncias elétricas. Utilizando esta informação, foram determinados os parâmetros de um modelo de rede térmica detalhada. O modelo foi validado experimentalmente, comparando os resultados simulados com os obtidos experimentalmente.

Finalmente, Panaras, Mathioulakis e Belessiotis (2014) propuseram um método para testar e avaliar o desempenho de um sistema solar combinado com uma BDC para aquecimento de água. A pesquisa baseou-se no método de teste de sistema dinâmico (DST) para instalações solares. A ponderação do desempenho do sistema exigia a avaliação do COP da BDC. No princípio, o método pedia aos pesquisadores prever parâmetros de consumo da BDC, e foi por isso que a análise dos resultados concluiu que um aumento da confiabilidade da previsão, exigiria uma modificação do modelo pelo método da DST, a fim de incluir os parâmetros de funcionamento da BDC, permitindo assim a aquisição, por meio de testes, de informações precisas sobre o funcionamento da BDC e consumo de energia.

## **2.7 Considerações finais.**

Neste capítulo foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os principais equipamentos utilizados para aquecimento de água doméstica. Entre os modelos apresentados destacam-se os sistemas convencionais de aquecimento de água por coletor solar, sistemas convencionais de aquecimento de água por BDC, conjunto de aquecimento de água por coletor solar e BDC, sistemas combinados de aproveitamento da energia solar térmica, energia solar fotovoltaica e BDC e sistemas de BDC com expansão solar direta. Também, estudou-se a bibliografia das diferentes técnicas de modelagem da radiação solar no Brasil e no mundo, o uso de técnicas de simulação de equipamentos coletores de energia solar e BDC.

Além do levantamento dos equipamentos, realizou-se uma pesquisa sobre os itens econômicos que impactam no mundo, o uso de dados solarimétricos para caracterizar novas tecnologias solares, o consumo e potencial de energia solar no Brasil, funcionamento de equipamentos de refrigeração e características importantes das BDC.

Também neste capítulo, foram estudadas outras linhas de pesquisas e autores que estão desenvolvendo trabalhos relacionados ao tema proposto. Dos trabalhos pesquisados e apresentados no referencial bibliográfico, os que estão mais próximos da linha de pesquisa deste trabalho são: Li et al (2007) que apresenta a análise experimental de um equipamento de coletor solar assistido com uma bomba de calor para aquecimento de água, o de De Melo Reis et al. (2012) que apresentou uma técnica alternativa para a redução do consumo de energia elétrica através da utilização de um sistema de energia solar em conjunto com uma BDC para aquecimento de água doméstico, o de Rahman, Saidur e Hawlader (2013) que incentiva o uso dos dados solarimétricos para caracterizar equipamentos de energia solar baixo o uso de simulações computacionais, o de Ibrahim et al. (2014a) que faz ensaios de diferentes configurações de sistemas de apoio para aquecimento de água residencial e também

desenvolvem uma metodologia interessante de acionamento dos sistemas de apoio e por último, o trabalho de Zhang et al. (2014) que publicou uma metodologia para fazer comparações de um equipamento solar térmico em três distintas cidades usando os dados meteorológicos das localidades.

Não obstante, este trabalho diferencia-se dos nomeados em grandes aspectos, entre eles estão:

O estudo de Li et al (2007) utiliza um compressor hermético com gás R-22 com potência nominal de 0,75 kW, diferente deste estudo que apresenta um compressor hermético com gás R-134a e potência nominal de 0,246 kW, ou seja um compressor de baixa potência.

O estudo de De Melo Reis et al. (2012) analisou o equipamento baseando-se em uma radiação constante levando a temperatura do fluido até 35°C, diferente deste estudo que apresenta uma modulação na tensão de alimentação das resistências elétricas simuladoras, conseguindo assim simular a radiação incidente de qualquer dia.

O estudo de Rahman, Saidur e Hawlader (2013) utiliza linguagem FORTRAN para fazer as simulações e o principal estudo da pesquisa foi apoiar um sistema de secagem, diferente deste estudo que apresenta simulações experimentais baseadas em dados de avaliação de imagens de satélite do projeto SWERA que serão convertidos em potência elétrica transferível à água e o sistema de apoio é usado só para aquecimento de água doméstica.

O estudo de Ibrahim, O. et al. (2014a), embora fizeram um estudo de dois configurações de BDC o fluido refrigerante utilizado foi uma mistura de R-22/R-124/R-152a, diferente deste estudo que apresenta como fluido refrigerante o uso do R-134a. Também apresenta diferenças no uso do coletor solar, já que os autores usaram o coletor solar como um trocador de calor entre as paredes do tanque de armazenamento. Em este trabalho é usado o efeito termossifão para fazer passar a água do tanque de armazenamento pelo interior do coletor solar, assim, aproveitando a troca de calor nos dias de alta radiação solar.

Por último, o estudo de Zhang et al. (2014) que publicou uma metodologia de comparações de um equipamento solar térmico em Londres, Shangai e Hong Kong, que difere deste estudo porque este é apresentado em uma cidade latino-americana.

Desta forma conclui-se que, de acordo com a pesquisa realizada em periódicos de grande circulação mundial, o presente estudo dispõe de características técnicas que o diferem dos demais estudos realizados até o momento.

### **3. METODOLOGIA.**

Neste capítulo descreve-se a metodologia aplicada para cumprir com os objetivos do trabalho. O capítulo inicia-se com o objeto de estudo, a coleta de dados de radiação solar, o planejamento e desenvolvimento dos algoritmos computacionais. Também é feito o cálculo da potência elétrica que simula a incidência de radiação no painel coletor, a descrição do protótipo, dos seus componentes e dos seus instrumentos de medição. O dispositivo experimental tem sido desenvolvido em parceria com a empresa Maxtemper Energia Solar.

#### **3.1 Objeto de estudo.**

Belo Horizonte é, muitas vezes, citada como a capital nacional do aquecimento solar, referência ao grande número dessas instalações de uso coletivo, ao número de fabricantes locais e à capacidade de prestação de serviços e geração de conhecimento na área. Essa posição foi alcançada pelo alinhamento de diversos fatores e atores, entre eles, o fato de as empresas fabricantes contarem com investimentos da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) e apoio técnico do setor acadêmico, por meio de ações de capacitação de recursos humanos, desenvolvimento de projetos de pesquisa, ensaios de equipamentos e simulação de uso de sistemas solares térmicos. Em Belo Horizonte, desenvolveu-se também tecnologia e cultura muito próprias com relação ao aquecimento solar, de modo que a cidade conta em dados do ano 2012 com mais de 2.600 edifícios residenciais equipados com sistemas centrais de aquecimento solar de água, que representam um grande diferencial da tecnologia mineira: milhares de litros de água aquecidos por um único sistema (Eletrobras e Procel, 2012).

Para a realização da pesquisa foi selecionada Belo Horizonte–MG como cidade de estudo e os dados de radiação solar foram obtidos pela avaliação de imagens de satélite do projeto SWERA.

#### **3.2 Coleta de dados.**

A coleta de dados foi realizada em duas etapas:

- Coleta dos dados de radiação solar.
- Coleta dos dados de consumo médio de água por pessoa.

A coleta dos dados de radiação solar foi realizada com o uso da ferramenta computacional Radiasol<sup>®</sup>, que é um programa de simulação das médias diárias mensais e anuais de radiação solar no plano do módulo, desenvolvido pelo laboratório de energia solar da

UFRGS – Labsol (2014). O ponto de partida para os cálculos é a informação da radiação solar global média mensal sobre a superfície horizontal que foram obtidas pela avaliação de imagens de satélites geostacionários, acompanhada da correspondente latitude e data (dia e mês).

A coleta de dados do consumo médio de água por pessoa foi feita através do Ministério do Meio Ambiente e o Ministério da Educação do governo do Brasil (Mma, Mec e Idec, 2005). Na pesquisa se detalha o consumo do fluido em litros cada vez que o usuário faz alguma das atividades descritas no QUADRO (3.1).

QUADRO 3.1

Consumo doméstico de água por atividade.

<b>Atividade</b>	<b>Quantidade (em litros)</b>
Uma descarga no WC	10 a 16
Um minuto de chuveiro	15
Uma caixa de água	150
Uma lavagem de mãos	3 a 5
Uma lavagem com máquina de lavar	150
Escovar os dentes com água corrente	11
Lavagem do automóvel com mangueira	100

FONTE – MMA, MEC e IDEC (2005).

### **3.3 Caracterização da coleta de dados.**

Para Belo Horizonte, o programa Radiasol<sup>®</sup> (Labsol, 2014) proporciona os dados de radiação horários médios mensais que atingem essa localidade, o que permite um estudo aprofundado no uso do equipamento ao longo do dia médio de cada mês.

No consumo de água quente, determina-se um tempo médio de consumo igual a 3 minutos de chuveiro aberto. Esta atividade é realizada por quatro pessoas (mãe, pai e dois filhos) o que é considerada uma família padrão, por tanto, o consumo final é de 180 litros por vez. Neste caso, avalia-se esta atividade duas vezes no dia, de manhã e no final da tarde, consumindo 360 litros por dia.

### **3.4 Construção do algoritmo 1 – Ferramenta de simulação do comportamento térmico de um coletor solar.**

O funcionamento do algoritmo é baseado na FIG. 3.1. Os dados de entrada são os valores de radiação global horária média mensal. O dado de saída é o valor da tensão de alimentação das resistências que permitirá simular a radiação absorvida pela placa coletora. A metodologia do algoritmo é ilustrada no GRA. 3.1.



FIGURA 3.1 – Relação das variáveis envolvidas no algoritmo 1.

FONTE – AUTOR.

A formulação do algoritmo computacional é feita no software LabVIEW utilizando as bases de dados da radiação solar descrita na seção 3.3 e as seguintes correlações:

A declinação solar ( $\delta$ ) é calculada pela EQ. (2.1) (Cooper, 1969).

É necessário conhecer o número de horas de brilho solar ( $N$ ), as quais são calculadas pela EQ. (3.1).

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \quad (3.1)$$

Onde as horas de brilho solar dependem da latitude do lugar avaliado e da declinação do sol na hora avaliada. Os ângulos horários e o ângulo horário médio são calculados a partir das EQ. (3.2), (3.3) e (3.4), onde  $Z=1$  para 4h.

$$\omega_1 = 15(Z - 1) - 120 \quad (3.2)$$

$$\omega_2 = 15Z - 120 \quad (3.3)$$

$$\omega = \omega_1 + 7,5 \quad (3.4)$$

O cálculo da radiação extraterrestre sobre uma superfície horizontal para um período entre os ângulos horários  $\omega_1$  e  $\omega_2$  é definida pela EQ. (3.5) (Duffie e Beckman, 2013).

$$I_o = \left(\frac{12 \times 3600}{\pi}\right) G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right] \left\{\cos(\phi) \cos(\delta) [\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)]\right\} + \left[\frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180}\right] \sin(\phi) \sin(\delta) \quad (3.5)$$

A EQUAÇÃO (3.6) proporciona o cálculo do coeficiente de distribuição das nuvens para dia claro e dia nublado para radiação horaria (Liu e Jordan, 1960).

$$k_T = I/I_o \quad (3.6)$$

O cálculo dos componentes para a radiação horaria é obtido pelo uso da EQ. (3.7). A fração da radiação difusa é definida pela correlação de Erbs, Klein e Duffie (1982), em que,

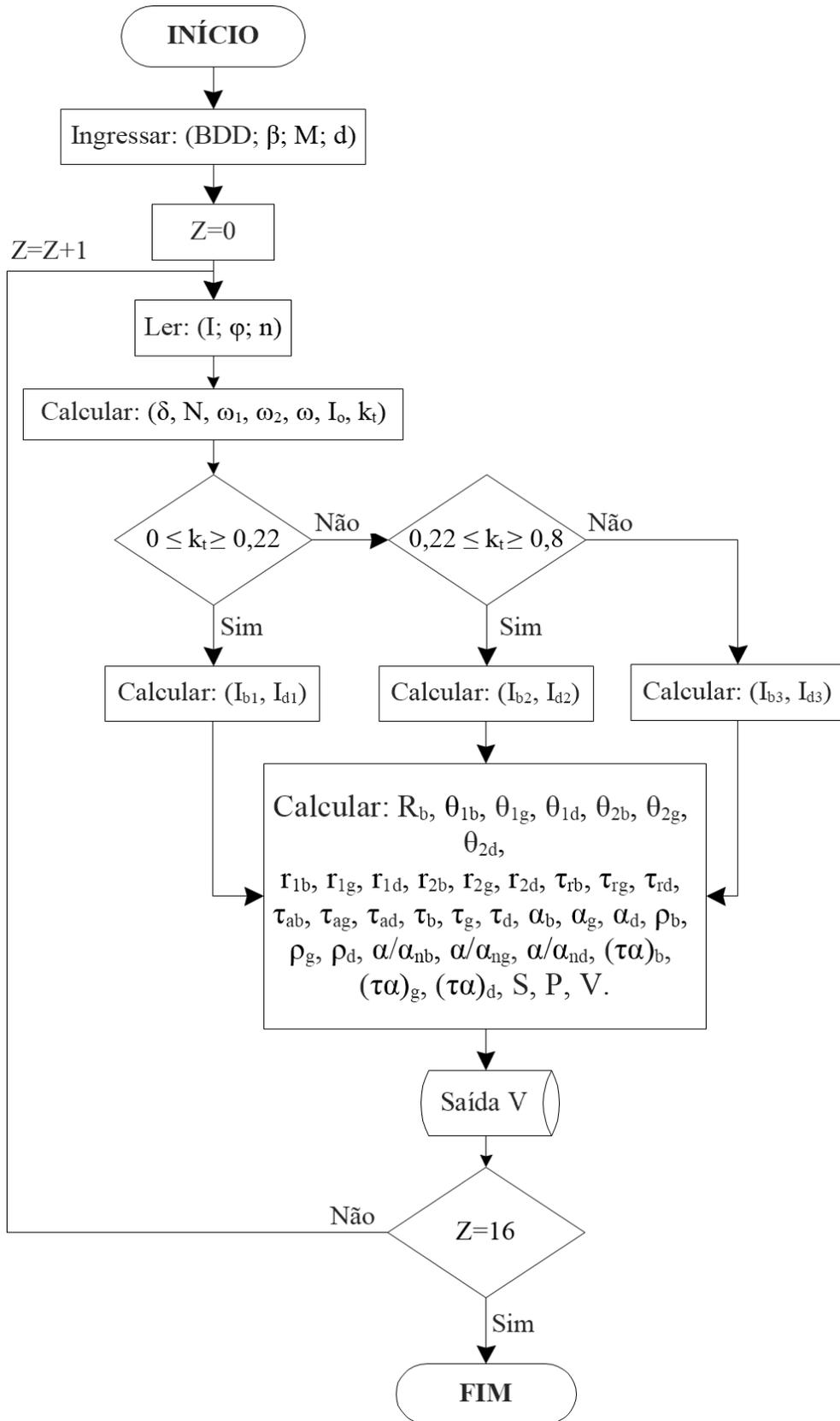


GRÁFICO 3.1 – Diagrama de fluxo do algoritmo 1. Simulador do comportamento térmico de um coletor solar baixo condições de radiação solar.

FONTE – AUTOR.

$$\frac{I_d}{I} \left\{ \begin{array}{ll} 1 - 0,09k_T; & \text{para } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4; & \text{para } k_T > 0,22 \text{ e } k_T \leq 0,8 \\ 0,165; & \text{para } k_T > 0,8 \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

A fração da radiação direta, EQ. (3.8), é obtida subtraindo-se a fração da radiação difusa da radiação global.

$$I_b = I - I_d \quad (3.8)$$

Para o cálculo da proporção da radiação direta em um plano inclinado (geralmente horizontal) é usada a EQ. (3.9).

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \text{sen}(\phi + \beta) \text{sen}(\delta)}{\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta)} \quad (3.9)$$

Observa-se que esta correlação depende dos fatores locais, da inclinação do painel e do ângulo horário médio avaliado.

Depois de conhecer os parâmetros da radiação solar é preciso fazer para cada ponto o cálculo da radiação absorvida no coletor solar. Para atingir este objetivo é indispensável conhecer valores dos índices da reflexão da radiação.

Os cálculos dos ângulos de incidência externa e interna do vidro para a radiação direta, difusa e de albedo são obtidos das EQ. (3.10), (3.11), (3.12) e (3.13) respectivamente, conhecendo que o índice de refletância do vidro é igual a  $I_R = 1,526$  (Duffie e Beckman, 2013). Os ângulos variam de acordo ao ângulo de inclinação do coletor em relação ao solo.

$$\theta_{1b} = \cos^{-1}[\cos(\phi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \text{sen}(\phi + \beta) \text{sen}(\delta)] \quad (3.10)$$

$$\theta_{1g} = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2 \quad (3.11)$$

$$\theta_{1d} = 59,7 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2 \quad (3.12)$$

$$I_R = \frac{\text{sen}(\theta_{1x})}{\text{sen}(\theta_{2x})} \quad (3.13)$$

Depois de conhecer os ângulos de incidência é necessário avaliar a componente perpendicular e a componente paralela da radiação não polarizada e assim, obter a média deste valor.

Para superfícies suaves, Fresnel (Duffie e Beckman, 2013) propôs as EQ. (3.14), (3.15) e (3.16) para a reflexão da radiação não polarizada que passa desde um meio um até um meio dois.

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_{2x} - \theta_{1x})}{\text{sen}^2(\theta_{2x} + \theta_{1x})} \quad (3.14)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\text{tan}^2(\theta_{2x} - \theta_{1x})}{\text{tan}^2(\theta_{2x} + \theta_{1x})} \quad (3.15)$$

$$r = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (3.16)$$

A transmitância da radiação inicialmente não polarizada é a transmitância média entre os dois componentes, obtida pela EQ. (3.17).

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (3.17)$$

A absorção da radiação em um meio parcialmente transparente está descrita pela lei de Bouguer (Duffie e Beckman, 2013), EQ (3.18), a qual baseia-se na hipótese que a radiação absorvida é proporcional à intensidade da radiação no meio e o comprimento (x) que a radiação viaja pelo meio.

$$\tau_a = e^{\left( -\frac{KL}{\cos(\theta_{2x})} \right)} \quad (3.18)$$

Onde K varia desde 4 m<sup>-1</sup> para vidro muito simples até 32 m<sup>-1</sup> para vidro com alto nível de oxido de ferro; e L é a espessura da lâmina de vidro, para esta pesquisa é considerada um valor padrão de 3 mm.

A transmitância, a refletância e a absortância para uma cobertura absorvente simples são avaliadas nas EQ. (3.19), (3.20) e (3.21), podem ser determinadas incluindo as perdas do sistema pelo método descrito por Siegel e Howell (2002).

$$\tau = \tau_a \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \left[ \frac{1 - r_{\perp}^2}{1 - (r_{\perp} \tau_a)^2} \right] \quad (3.19)$$

$$\rho = r_{\perp} (1 + \tau_a \tau) \quad (3.20)$$

$$\alpha = (1 - \tau_a) \left( \frac{1 - r_{\perp}}{1 - r_{\perp} \tau_a} \right) \quad (3.21)$$

Utiliza-se o polinômio de Pettit & Sowell (1976), descrito na EQ. (3.22), que determina a direção da absorvância para a radiação solar em uma superfície preta de uma placa plana ordinária. Este polinômio é função do ângulo de incidência da radiação sobre a superfície.

$$\alpha/\alpha_n = 1 + 1,5879x10^{-3}\theta + 2,7314x10^{-4}\theta^2 - 2,3026x10^{-5}\theta^3 + 9,0244x10^{-7}\theta^4 - 1,8x10^{-8}\theta^5 + 1,7734x10^{-10}\theta^6 - 6,9937x10^{-13}\theta^7 \quad (3.22)$$

O produto transmitância-absorvância, EQ. (3.23), deve ser pensado como uma propriedade de combinação da cobertura absorvente, em vez do produto de duas propriedades.

$$(\tau\alpha)_x = 1,01\tau(\alpha/\alpha_n)\alpha_n \quad (3.23)$$

Por último, faz-se desenvolvimento dos cálculos da potência absorvida pela placa descrita na EQ. (3.24), chamada de potência S. Para conhecer o valor da potência S precisa-se conhecer os dados das equações supracitadas, desde reflexão da radiação até o produto transmitância-absorvância.

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + \rho_g I_T (\tau\alpha)_g \left[ \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (3.24)$$

A partir dos valores calculados nas EQ. (3.25), (3.26), (3.27), (3.28), (3.29), (3.30) e (3.31) é possível fazer o cálculo das perdas totais do coletor pela EQ. (3.32).

A EQUAÇÃO (3.25) permite determinar as perdas de calor pela superfície superior do coletor. A EQ. (3.29) é usada para determinar as perdas pela superfície inferior do coletor e a EQ. (3.30) as perdas pela superfície lateral do coletor.

Na maioria dos coletores a avaliação das perdas pela superfície lateral do coletor é complexa. Contudo, em um sistema bem projetado estas perdas podem ser muito pequenas, tanto assim, que as vezes não há necessidade de calculá-las com muita exatidão. Tabor (1959) recomenda uma isolamento lateral com uma espessura igual a espessura inferior do coletor. Estas perdas são estimadas assumindo que o fluxo de calor é unidimensional em todo o perímetro do coletor.

$$U_T = \left\{ \frac{N}{\frac{c}{T_{pm}} \left[ \frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,00591N h_w} + \frac{2N + f - 1 + 0,133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (3.25)$$

$$f = (1 + 0,089h_w - 0,1166h_w\varepsilon_p)(1 + 0,07866N) \quad (3.26)$$

$$C = 520(1 - 0,000051\beta^2) \quad (3.27)$$

$$e = 0,430[1 - (100/T_{pm})] \quad (3.28)$$

$$U_b = k/L \quad (3.29)$$

$$U_e = (UA)_l/A_c \quad (3.30)$$

$$(UA)_l = (k/t_l)P_c t_c \quad (3.31)$$

Por último,

$$U_L = U_b + U_e + U_T \quad (3.32)$$

O calor final necessário de ser transmitido à água é determinado pela EQ. (3.33). Esta quantidade de calor é a que deverá ser fornecida pela resistência elétrica. Para que isso seja possível é preciso fazer medições contínuas da temperatura da água de entrada no coletor e da temperatura ambiente.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (3.33)$$

Onde o fator  $F_R$  é o fator de remoção da placa coletora e é dado pela EQ. (3.34)

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_c U_L} \left[ 1 - \frac{\frac{S}{U_L} - (T_{fo} - T_a)}{\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right] \quad (3.34)$$

Tendo o valor do calor teoricamente absorvido pela água é necessário fazer a conversão desse valor ao calor proveniente da potência elétrica. Com isso, os últimos cálculos no algoritmo são: o valor da potência elétrica obtido pela EQ. (3.35) e o valor da quantidade de tensão obtido pela EQ. (3.36).

$$P = Q_u \left( \frac{3600}{8} \right) \quad (3.35)$$

$$V = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (3.36)$$

Finalmente, o cálculo destas variáveis é feito para todos os dados de radiação solar horários armazenados em um dia de avaliação.

### 3.5 Caracterização do coletor simulado.

Para realizar as simulações e conseguir fornecer os dados necessários para a modelagem termodinâmica de um coletor, o QUADRO (3.2) agrupa as características necessárias de um coletor padronizado.

QUADRO 3.2

Parâmetros do coletor simulado

<b>Parâmetro</b>	<b>Medida</b>
Área de coleta	2,4 m <sup>2</sup>
Número de coberturas	1
Espessura do vidro cobertor	3 mm
Inclinação do coletor	36°
Índice de refractância médio para o vidro – 1 cobertura	1,526
Emitância da placa tinta preta	0,96
Emitância do vidro	0,88
Espessura do isolante lateral	25 mm
Espessura do isolante da placa	50 mm
Condutividade do isolante	0,045 W/m °C
Número de tubos	8
Diâmetro dos tubos	10 mm
Distância entre tubos	12 mm
Condutividade da placa	385 W/m °C
Espessura da placa	0,5 mm

FONTE – AUTOR.

### 3.6 Construção do algoritmo 2 – Simulador da demanda de água em uma casa de quatro habitantes.

A construção do algoritmo 2 ilustrado no GRA. 3.2 é baseada na análise feita na caracterização dos dados (seção 3.3), onde, uma casa padrão consome um total de 360 l de água quente por dia. Este consumo é feito em duas jornadas, 180 litros às 6h e 180 litros às 18h, horários que são destacados pelo grande consumo de energia elétrica no setor residencial para aquecimento de água (Reis, 2012). O algoritmo foi também programado no software LabVIEW usando as saídas digitais (D01 e D02) da placa NI 6211, as quais fazem a ativação de duas válvulas solenoides on/off.

A abordagem do algoritmo 2 é a seguinte:

No início da simulação é designada uma variável Z, onde cada vez que passa uma hora de simulação aumenta o seu valor em uma unidade ( $Z=Z+1$ ). Na lógica da programação pergunta-se se no valor da variável Z encontra-se armazenado o valor de 2, que é o valor equivalente às 6h, ou contém um valor de 14 que é o valor equivalente para 18h, se no momento da pergunta nenhum dos valores são iguais ao valor armazenado, o algoritmo continua com as válvulas fechadas. Quando esta lógica é positiva, o algoritmo envia um sinal de controle que ativa duas válvulas solenoides que permitem tirar água quente para o consumo e ao mesmo tempo repor com água da torneira o que foi consumido. Ao atingir uma demanda de 180 litros, o programa desativa as válvulas de controle e assim, procura pelo encerramento da simulação, perguntando se na variável Z está armazenado o valor de 16, valor equivalente a 20h, onde por análise da base de dados obtida, representa um horário onde não há coleta de radiação solar na superfície coletora para todos os meses.

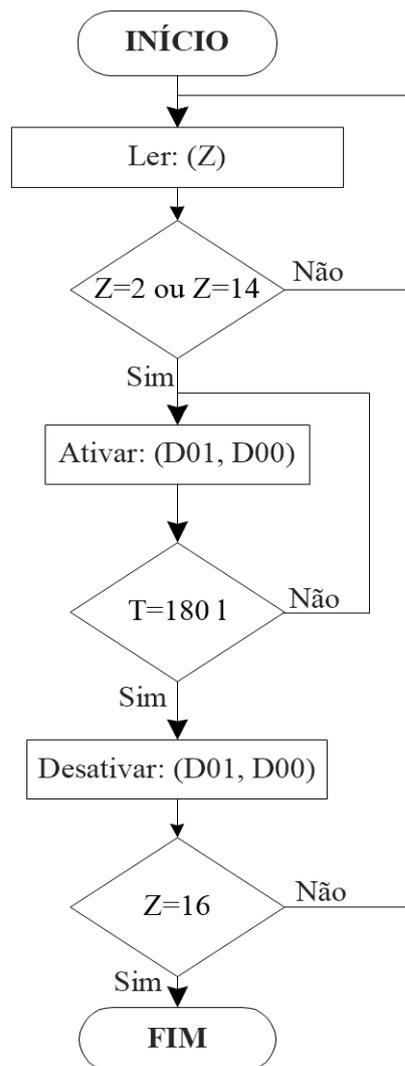


GRÁFICO 3.2 – Fluxograma do algoritmo 2. Simulador da demanda de água em uma casa de três habitantes.

FONTE – AUTOR.

### 3.7 Construção do algoritmo 3 – Algoritmo de controle para acionamento do sistema de apoio (BDC).

O sistema de apoio do coletor solar deve ser ativado quando com o aproveitamento da radiação solar simulada e com o consumo da água quente o equipamento não consiga atingir uma temperatura de armazenamento no tanque igual ou superior a 45°C. Para atingir este objetivo, a estratégia de programação é baseada no GRA. 3.3.

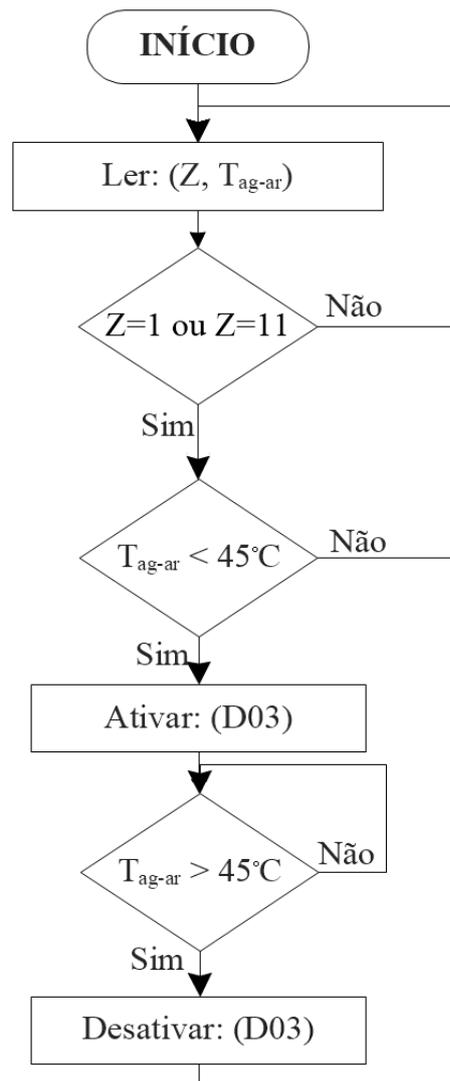


GRÁFICO 3.3 – Fluxograma do algoritmo 3. Algoritmo de controle para acionamento da BDC.

FONTE – AUTOR.

O algoritmo 4 foi programado no software LabVIEW e utiliza uma saída digital (D03) da placa NI 6211.

A lógica implementada no algoritmo controla a ativação ou desativação do dispositivo auxiliar.

No início do programa, o algoritmo baseia-se também no uso da variável  $Z$  como é feito no algoritmo 2, porém, também é lida a variável  $T_{ag-ar}$  que armazena o valor da temperatura da água armazenada no tanque de armazenamento disposta para consumo. No primeiro passo, é perguntado se o valor de  $Z$  é igual a 1 ou 11, valores equivalentes às 5h e 17h respectivamente. Se este caso é verdadeiro, é perguntado se a temperatura da água ( $T_{ag-ar}$ ) tem um valor menor a  $45^{\circ}\text{C}$  o que se for afirmativo, é necessário ativar a saída D03 (ativação da BDC). Esta ativação é feita o tempo necessário para que o valor da temperatura da água seja igual a  $45^{\circ}\text{C}$ ; ao atingir esta temperatura, será feita a desativação da BDC e finalmente a água estará pronta para ser consumida.

Pode-se observar que este algoritmo não tem um final, já que por ser um sistema auxiliar é necessário que esteja sempre fazendo a sua função.

### 3.8 Interface do usuário.

A interface do usuário apresentada na FIG. 3.2 foi desenhada no software LabVIEW. Esta interface é composta de quatro zonas principais e estas zonas de subzonas que são discutidas a seguir.

A zona A é formada pelas tabelas A1, A2, A3 e A4.

A subzona A1 corresponde aos dados de radiação global incidente obtidos pela base de dados do programa Radiasol<sup>®</sup>. A subzona A2 armazena os valores da radiação  $S$ , que é o valor de radiação total absorvido pela placa simulada. A subzona A3 registra o parâmetro  $kt$  para cada hora específica de simulação e, por último, a subzona A4 corresponde ao valor de potência elétrica que deve ser transferida à água

Na zona B pode-se observar os dados do dia de simulação, y valores individuais que estão sendo aplicados em tempo real.

A célula B1 representa o valor de radiação global total incidente na placa que está sendo avaliada nesse momento. As células B2 e B3 são os ângulos horários. A célula B4 informa o dia de simulação e a célula B5 a declinação do sol. Na célula B6 é informado o parâmetro  $kt$  horário. Os dados armazenados nas células B7, B10 e B11 correspondem a radiação solar extraterrestre, a parcela de radiação difusa e a parcela de radiação direta respectivamente. Por último, as células B12, B13 e B14 representam a potência aplicada nesse instante ao painel, a potência absorvida teoricamente e a taxa de radiação direta sobre o plano inclinado respectivamente.

Na zona C têm-se os valores predeterminados que permitem o funcionamento correto da base de dados implementada (Belo Horizonte.xlsx), são visíveis porque visou-se que

o aplicativo permitisse a aplicação de bases de dados de outras cidades. As células C1 e C2 e a leitura dos sensores que medem temperatura ambiente e temperatura de saída do coletor solar, necessários no desenvolvimento dos cálculos do algoritmo 1. A chave C3 é o controle de encerramento da simulação. A célula C4 permite a seleção do arquivo Excel que contém os dados de simulação. As células C5, C6 y C7 permitem fazer o controle dos dados que o programa precisa ler, são dados constantes de programação.

Finalmente, a zona D ilustra o comportamento da radiação solar incidente no transcorrer da simulação.

### 3.9 Cálculo da potência elétrica equivalente

Baseando-se na metodologia de Duffie e Beckman (2013) e a compilação de dados solarimétricos feita pela CRESESB (2000) no Atlas Solarimétrico do Brasil foi desenvolvida a modelagem que permitiu determinar a potência elétrica necessária do equipamento. Os dados relevantes para o cálculo são: Mês com a maior radiação registrada: Janeiro. Radiação média mensal nesse mês:  $20,6 \text{ MJm}^{-2}$  ou  $5722,22 \text{ Wm}^{-2}$ . Em seguida, faz-se o cálculo da radiação total horária média mensal baseando-se na EQ. (3.37).

$$\bar{H}_T = I_T N \quad (3.37)$$

Onde  $\bar{H}_T$  é a irradiação total diária média mensal,  $I_T$  é a radiação total horária média mensal e  $N=6,2$  é o número médio de horas de brilho solar no mês de janeiro.

$$I_T = 3,32 \text{ MJm}^{-2} = 922,22 \text{ Wm}^{-2}$$

Adotando o resultado obtido a partir da EQ. (3.37), calcula-se a radiação na superfície inclinada e horizontal para céu anisotrópico (Modelo HDKR). Segundo Duffie e Beckman (2013), a radiação máxima em um dia qualquer é alcançada ao meio dia, e é nesse caso que a avaliação é feita para o dia 17 de janeiro, sendo o dia 17 o adotado pelos autores como o dia médio do mês. Para determinar este parâmetro, Hottel (1976) desenvolveu uma modelagem que estima a radiação solar com céu claro baseado no tipo de clima da localidade, a altura e o ângulo de incidência da radiação na hora avaliada representada na EQ. (3.38).

$$\tau_b = \alpha_0 + \alpha_1 e^{\left(\frac{k}{\cos\theta_z}\right)} \quad (3.38)$$

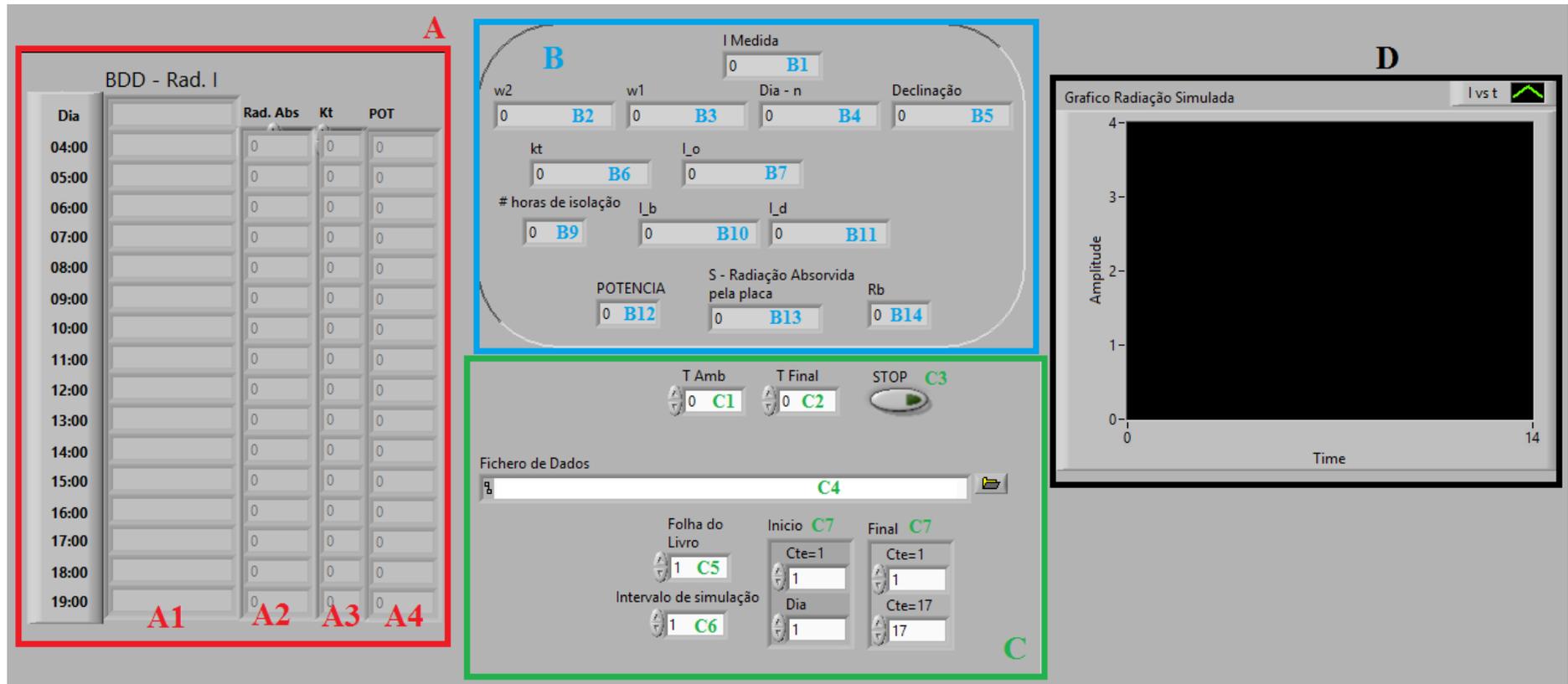


FIGURA 3.2 – Interface do usuário, ferramenta de simulação coletor solar.

FONTE – AUTOR.

As constantes  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  e  $k$  são valores baseados em uma atmosfera padrão com aproximadamente 23 km de visibilidade. Os valores destes parâmetros são corrigidos para qualquer localidade usando a altitude nas EQ. (3.39), (3.40) e (3.41).

$$\alpha_0^* = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2 \quad (3.39)$$

$$\alpha_1^* = 0,5055 - 0,00595(6,5 - A)^2 \quad (3.40)$$

$$k^* = 0,2711 - 0,01858(2,5 - A)^2 \quad (3.41)$$

Onde,  $A = 0,858$  km para a cidade de Belo Horizonte, MG (Apollo11, 2014).

Assim:

$$\alpha_0^* = 0,206$$

$$\alpha_1^* = 0,316$$

$$k^* = 0,221$$

Segundo Hottel (1976), fatores de correção devem ser aplicados para um clima característico da cidade avaliada,  $r_0 = a_0/a_0^*$ ,  $r_1 = a_1/a_1^*$  e  $r_k = k/k^*$ . Para Belo Horizonte o clima é considerado tropical, onde  $r_0 = 0,95$ ,  $r_1 = 0,98$  e  $r_k = 1,02$ . Logo,

$$\alpha_0 = 0,1957$$

$$\alpha_1 = 0,309$$

$$k = 0,225$$

Por conseguinte, avalia-se a EQ. (3.38) conhecendo que  $\theta_z = 3,4^\circ$  ao meio dia.

$$\tau_b = 0,583$$

Para conhecer a radiação direta no plano do coletor tem-se a EQ. (3.42).

$$I_b = I_{on}\tau_b \cos(\theta_z) \quad (3.42)$$

$$I_{on} = I_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right]; I_{sc} = 1367 \text{ Wm}^{-2} \quad (3.43)$$

$$I_{on} = 1410,2 \text{ Wm}^{-2}$$

$$I_b = 968,10 \text{ Wm}^{-2}$$

Para o cálculo da quantidade de radiação difusa no dia 17 de janeiro, Liu e Jordan (1960) desenvolveram a EQ. (3.44), uma correlação empírica entre o coeficiente de transmitância da radiação direta e o coeficiente de transmitância da radiação difusa para dia com céu claro.

$$\tau_d = 0,271 - 0,294\tau_b \quad (3.44)$$

$$\tau_d = 0,099$$

A radiação difusa pela correlação de Liu e Jordan (1960) é,

$$I_d = I_{on}\tau_d \cos(\theta_z) \quad (3.45)$$

$$I_d = 139,36 \text{ Wm}^{-2}$$

Por fim, a radiação total incidente no coletor baseada no modelamento de céu claro é  $I_T = I_b + I_d = 1107,46 \text{ Wm}^{-2}$  e para este valor é estudada a correção pelo Modelo HDKR.

Davies e Hay (1980) estimaram a fração da radiação difusa como circunsolar e consideraram que ela percorria a mesma direção que o feixe de radiação direta; Os autores não trataram o horizonte iluminado. Reindl, Beckman e Duffie (1990) adicionam o termo de horizonte iluminando no Modelo de Hay e Davies, e por último, Klucher (1979) propôs a EQ. (3.46) dando o nascimento ao Modelo HDKR.

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \left[ 1 + f \text{sen}^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (3.46)$$

$$A_i = I_b / I_o \quad (3.47)$$

$$f = \sqrt{I_b / I} \quad (3.48)$$

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \text{sen}(\phi + \beta) \text{sen}(\delta)}{\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta)} \quad (3.49)$$

Onde,  $\phi = -19,81$ ,  $\delta = -20,92$ ,  $\omega = -7,5$ ,  $\beta = 36^\circ$ .

De acordo com as soluções das EQ. (3.47), (3.48) e (3.49)

$$R_b = 0,796$$

Conhecendo que  $I_b = 968,10 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $I_o = I_{on} \cos(\theta_z) = 1409,98 \text{ Wm}^{-2}$  e  $I = 1107,46 \text{ Wm}^{-2}$ ,

$$A_i = 0,874$$

$$f = 0,935$$

Segundo a EQ. (3.46) e com  $I_d = 139,36 \text{ Wm}^{-2}$ ,

$$I_T = 883,97 \text{ Wm}^{-2}$$

O anexo B contém os cálculos que foram feitos no software EES baseados nas diferentes correlações da avaliação dos coletores solares de placa plana para radiação total máxima. Os resultados foram os seguintes: radiação horária total máxima média mensal ( $I_T = 883,97 \text{ Wm}^{-2}$ ), radiação horária difusa máxima média mensal ( $I_d = 139,36 \text{ Wm}^{-2}$ ), radiação horária direta máxima média mensal ( $I_b = 968,10 \text{ Wm}^{-2}$ ) e potência elétrica máxima total por tubo de cobre 188 W.

Foram projetadas 8 resistências em série com valores de 4 ohm cada, a tensão máxima de alimentação foi 220V.

### 3.10 Dias de simulação e temperatura ambiente simulada.

A TAB. 3.1 contém as temperaturas ambiente médias para cada um dos meses do ano, as quais são de grande importância na simulação das perdas no coletor solar.

Seguindo a metodologia de Duffie e Beckman (2013), os dias médios que melhor representam o comportamento de cada mês encontram-se na TAB. 3.2. Esses dias são os avaliados no algoritmo de simulação.

TABELA 3.1

Temperatura ambiente média nos meses do ano em Belo Horizonte

MÊS	$\bar{T}_{amb}$ [°C]	MÊS	$\bar{T}_{amb}$ [°C]	MÊS	$\bar{T}_{amb}$ [°C]
Janeiro	23,15	Maiο	20,30	Setembro	20,70
Fevereiro	22,65	Junho	18,10	Outubro	22,80
Março	23,00	Julho	18,90	Novembro	22,90
Abril	22,15	Agosto	20,25	Dezembro	21,85

FONTE – LABSOL (2014)

TABELA 3.2

Dia médio recomendado durante o mês e valores de n.

Mês	n para i dia do mês	Para o dia médio do mês		
		Dia	n	$\delta$
<b>Janeiro</b>	i	17	17	-20,9
<b>Fevereiro</b>	31+i	16	47	-13,0
<b>Março</b>	59+i	16	75	-2,4
<b>Abril</b>	90+i	15	105	9,4
<b>Mai</b>	120+i	15	135	18,8
<b>Junho</b>	151+i	11	162	23,1
<b>Julho</b>	181+i	17	198	21,2
<b>Agosto</b>	212+i	16	228	13,5
<b>Setembro</b>	243+i	15	258	2,2
<b>Outubro</b>	273+i	15	288	-9,6
<b>Novembro</b>	304+i	14	318	-18,9
<b>Dezembro</b>	334+i	10	344	-23,0

FONTE - DUFFIE e BECKMAN (2013), p 14

### 3.11 Descrição do protótipo.

#### 3.11.1 Sistema de apoio (BDC).

O conjunto de teste consiste em dois protótipos ilustrados na FIG. 3.3 e seus componentes são listados no QUADRO (3.3).

O primeiro é um sistema de aquecimento por compressão de vapor, tendo R-134a como fluido primário e como fluidos secundários ar no evaporador e água no condensador. O reservatório térmico possui capacidade de armazenamento de 200l. Este sistema é composto, basicamente, por um compressor alternativo hermético do tipo pistão, por um condensador a água construído de tubo de cobre, por um evaporador estático de 3/8 de polegada com 16 m de comprimento de tubo de cobre, e por um dispositivo de expansão - válvula termostática Danfoss TEN 2- orifício NR0X. A linha de fluido frigorífico conta com uma garrafa de líquido – dispositivo da marca frigor, instalado à saída do condensador, bem como, com um filtro secador, marca Danfoss modelo DML 052, para retenção de líquidos e impurezas provenientes do sistema.

Os tubos e acessórios foram recobertos com isolante térmico composto por um tubo esponjoso de polietileno blindado com espessura de 9 mm para diminuir a influência das condições do ambiente externo sobre o equipamento.

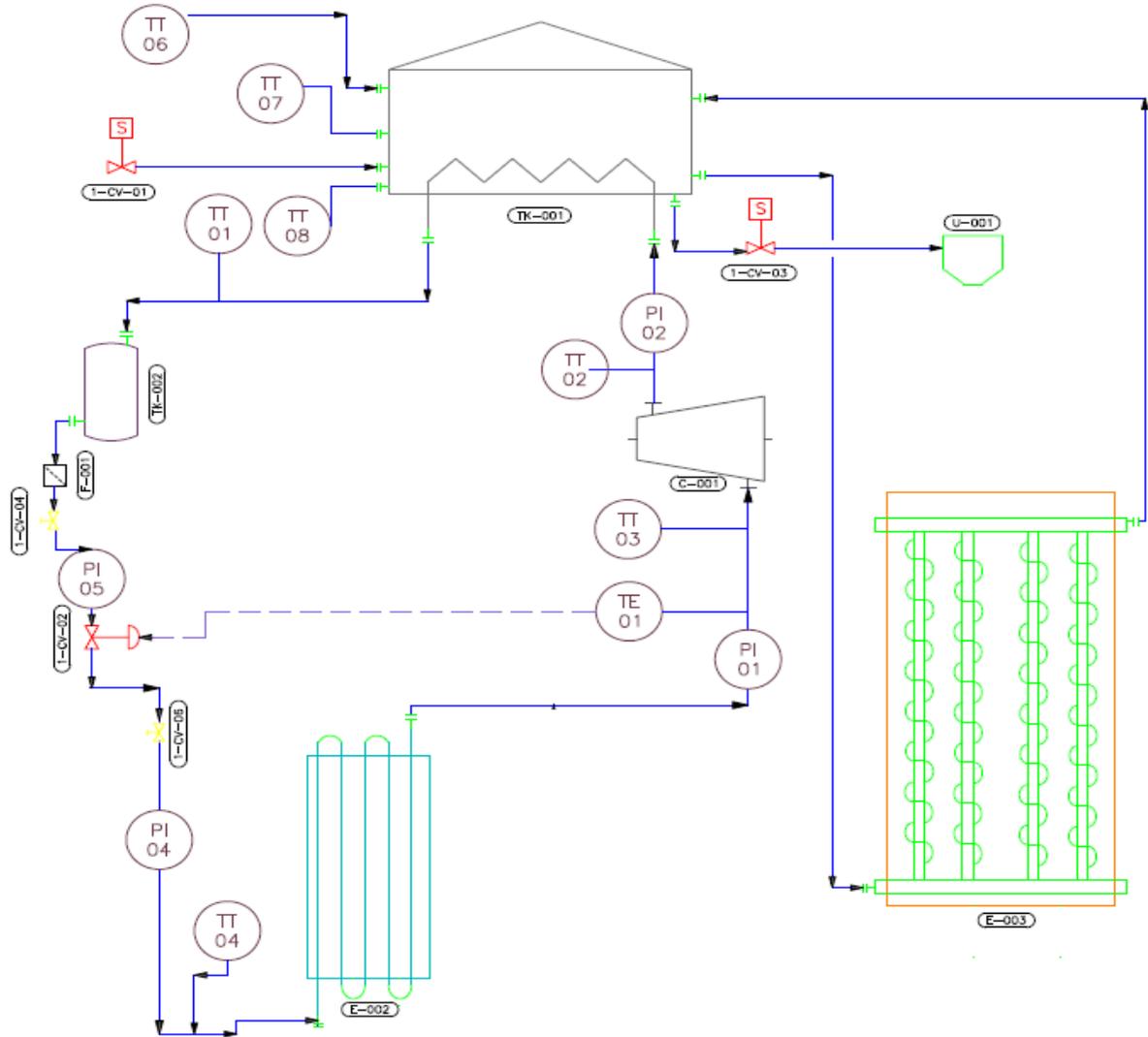


FIGURA 3.3 – Diagrama PID do mecanismo de apoio (BDC)

FONTE – AUTOR.

QUADRO 3.3

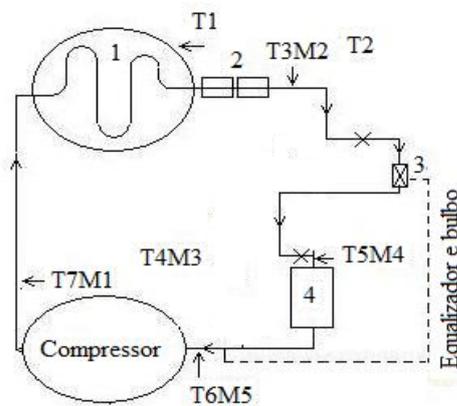
Lista de componentes da FIG 3.3

1-CV-01	Válvula solenoide
TK-001	Tanque de armazenamento
1-CV-03	Válvula solenoide
U-001	Chuveiro
TK-002	Garrafa acumuladora de líquido
C-001	Compressor hermético para fluido R134a
F-001	Filtro secador
1-CV-04	Válvula manual
1-CV-06	Válvula manual
1-CV-02	Válvula de expansão termostática
E-001	Evaporador estático
E-002	Simulador de coletor solar

FONTE – AUTOR.

A instrumentação para medição das variáveis de temperatura e pressão na BDC foi instalada segundo a FIG. 3.4, 6 sensores de temperatura termopares tipo K do fabricante ECIL e 4 Manômetros.

O protótipo foi conectado a um medidor digital de energia elétrica da Marca Kron, modelo MKE-01, que mede o consumo de energia elétrica real da energia consumida pelo compressor. Este medidor foi utilizado, devido à necessidade de se avaliar o coeficiente de desempenho (COP) real da máquina, que relaciona a potência transferida para a água do reservatório com o consumo real de energia elétrica do equipamento.



Legenda:	Localização dos Termopares:	Localização dos Manômetros
1-Condensador	T1-Reservatório de água	M1-Saída do compressor
2-Garrafa de líquido e filtro	T2-Temperatura ambiente	M2-Saída do condensador
3-Válvula termostática	T3-Saída do condensador	M4-Evaporador estático
4-Evaporador Estático	T5-Evaporador estático	M5-Entrada do compressor
X-Registro	T6-Entrada do compressor	
	T7-Saída do compressor	

FIGURA 3.4 – Desenho esquemático do protótipo BDC.

FONTE – AUTOR.

### 3.11.1.1 Compressor.

O compressor é do tipo hermético, com pistão, da marca Embraco, modelo FFV 100 HAK (FIG. 3.5) de baixo consumo de energia e baixo custo de aquisição. Este compressor opera com o fluido R-134a (tetrafluoretano CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>), que é um refrigerante não prejudicial ao meio-ambiente que evita a degradação da camada de ozônio, sendo recomendado oficialmente como substituto do R12. O compressor tem uma potência igual a 1/3 HP, alimentação a 220V/60Hz.



FIGURA 3.5 – Compressor.

FONTE – REIS (2012).

### 3.11.1.2 Evaporador estático.

O evaporador estático é um conjunto serpentina-aleta construído para o aproveitamento da convecção natural imposta pelo ar ambiente e em alguns casos o aproveitamento da energia proveniente da radiação difusa que consegue um aumento considerável do coeficiente de troca de calor do fluido refrigerante.

Neste projeto o evaporador estático é composto por 16 m de comprimento do tubo de cobre. As FIG. 3.6 e 3.7 apresentam o desenho do evaporador estático.

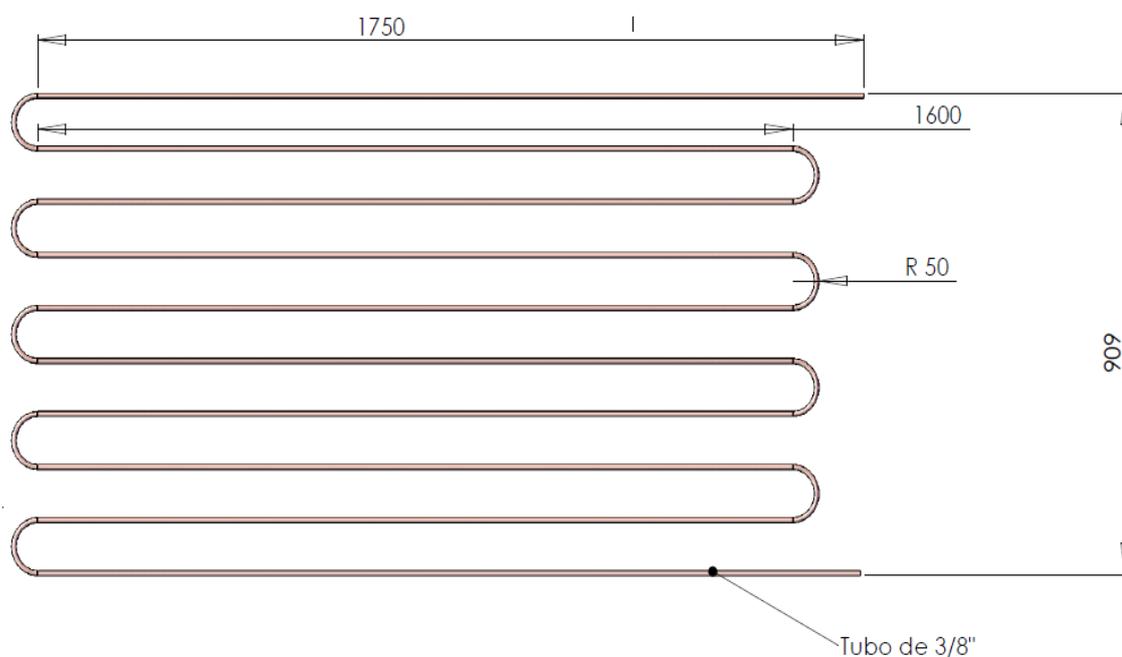


FIGURA 3.6 – Desenho da serpentina do evaporador estático. Cotas em mm.

FONTE – REIS (2012).

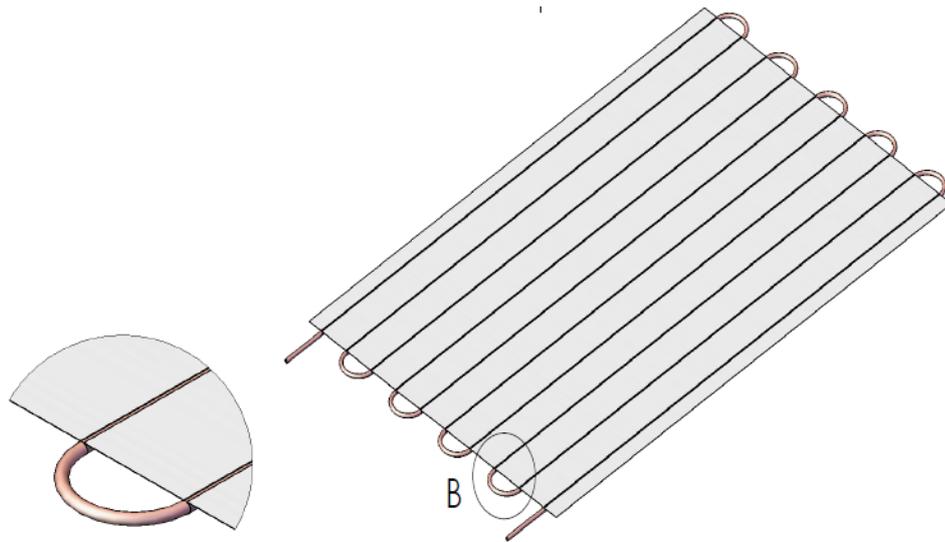


FIGURA 3.7 – Desenho do evaporador estático com a serpentina e a placa (aleta) dissipadora de calor  
 FONTE – REIS (2012).

3.11.1.3 Condensador

O condensador é um trocador de calor de serpentina horizontal, que tem por finalidade transferir o calor à água armazenada e assim condensar o refrigerante após a saída do compressor, para garantir o estado líquido ao chegar ao dispositivo de expansão. No condensador, o fluido refrigerante escoa pelo tubo interior de 8 mm de diâmetro interno e 4,5 m de comprimento. As FIG. 3.8 e 3.9 ilustram o desenho e posicionamento do condensador dentro do reservatório da água.

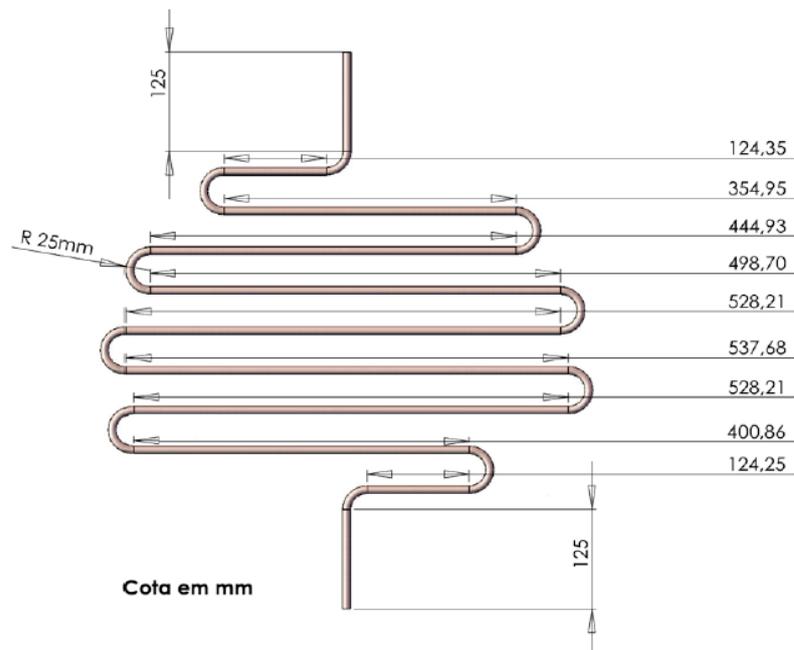


FIGURA 3.8 - Desenho do Condensador.  
 FONTE – REIS (2012).



FIGURA 3.9 – Condensador dentro do reservatório.

FONTE – REIS (2012).

#### 3.11.1.4 Válvula de expansão termostática.

A válvula de expansão termostática regula a injeção de líquido refrigerante no evaporador. A injeção é controlada em função do superaquecimento do refrigerante na entrada do compressor. A FIG. 3.10 ilustra o corpo da válvula Danfoss TEN2 orifício NR0X.



FIGURA 3.10 – Válvula de expansão termostática Danfoss TEN2 R-134a

FONTE – <http://www.polipartes.com.br/>

#### 3.11.2 Sistema de simulação da placa coletora.

O sistema de simulação da placa coletora mostrado na FIG. 3.12 consiste em 8 tubos paralelos de 3/8 de polegada com 1,82 m de comprimento e 12 mm de separação. O painel tem 36° de inclinação para permitir que o efeito termossifão aconteça. O conjunto é recoberto com lâminas de lã de vidro de 3 cm de espessura, de forma que permita isolar os fenômenos externos.

A transferência de calor à água é feita pelo uso de 8 fios níquel-cromo 19 AWG que funcionam como resistências elétricas ilustrado na FIG. 3.11.



FIGURA 3.11 – Resistência elétrica enrolada no tubo de cobre do coletor solar para simular o efeito termossifão.  
FONTE – REIS (2012).



FIGURA 3.12 – Conjunto de resistências elétricas e tubos.  
FONTE – REIS (2012).

### 3.11.3 Componentes de controle.

Os componentes de controle são dispositivos que permitem o desenvolvimento do projeto. Para isso, é necessário principalmente o uso da placa de aquisição de dados NI 6211. Dos recursos disponibilizados nesta placa são usados uma saída analógica (16 bits, 250 kS/s) e 3 saídas digitais. Para cumprir os comandos dos algoritmos 1, 2 e 3 explicados na seção 3.4,

3.5 e 3.6, as saídas digitais são utilizadas para enviar sinais de controle para três relés de estado sólido SSR monofásicos CR1 de fabricação nacional pela Contemp. Dois relés acionam as válvulas solenoides marca Jefferson série 2036 que permitem mediante sua abertura simular o consumo de água e o terceiro faz o acionamento da BDC. Estas etapas de controle são ilustradas na FIG. 3.13 e 3.14.

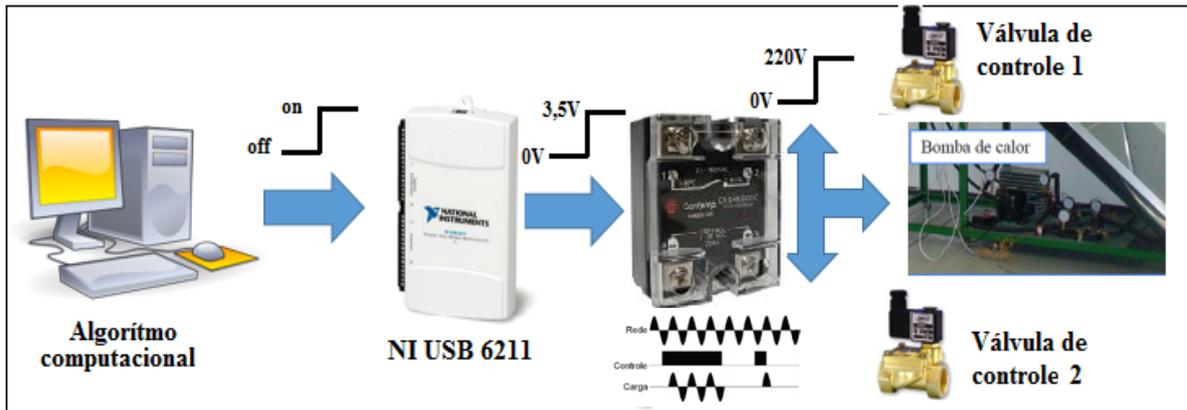


FIGURA 3.13 – Desenho do controle para acionamento de válvulas e acionamento da BDC.

FONTE – AUTOR.

Na modulação da potência elétrica (algoritmo 1, seção 3.4) precisa-se da saída analógica da NI USB 6211, um módulo de conversão de sinais 10V420ADC-127 marca Secon e um relé de estado sólido controlador da tensão por ângulo-de-fase modelo AFC01 da Contemp.

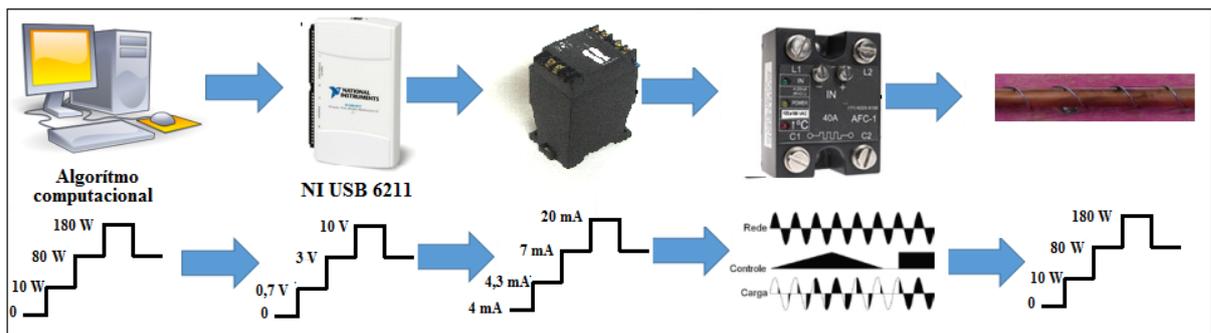


FIGURA 3.14 – Desenho do controle para acionamento de válvulas e acionamento da BDC.

FONTE – AUTOR.

Estes equipamentos em conjunto permitem a modulação da tensão de alimentação. Assim, as resistências elétricas contidas no interior da placa solar permitem ter diferentes valores de potência elétrica com a finalidade de fazer uma simulação completa da radiação solar em uma hora determinada do dia. A simulação de diferentes comportamentos de radiação diária permite elevar a temperatura da água.

Finalmente, o sistema híbrido estudado é mostrado na FIG. 3.15.

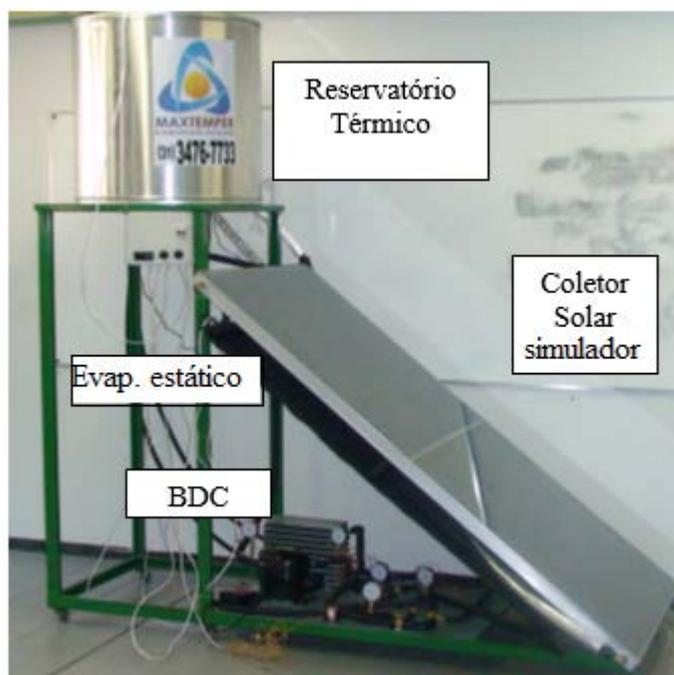


FIGURA 3.15 – Vista geral do equipamento.

FONTE – REIS (2012).

### 3.12 Plano de ensaios.

Para fins de comparação de resultados foi realizado o seguinte ensaio no sistema: aquecimento da água através do painel coletor simulando as radiações sazonais representativas de Belo Horizonte, quando a temperatura de armazenamento não atingisse as exigências do usuário (temperatura maior ou igual a 45°C) será usada a BDC para ajudar a conseguir a temperatura de 45°C.

Para cada uma das situações acima descritas, foram obtidas as seguintes informações:

1. Temperatura ambiente.
2. Temperatura da água na entrada do coletor – ponto 1;
3. Temperatura da água no ponto 2 do coletor;
4. Temperatura da água no ponto 3 do coletor;
5. Temperatura da água no ponto 4 do coletor;
6. Temperatura da água na saída do coletor – ponto 5;
7. Consumo de energia elétrica do mecanismo da BDC e tempo de funcionamento;
8. Temperatura no interior do reservatório de água (temperatura no nível superior, meio e baixo);

9. Temperatura na entrada do compressor;
10. Pressão do fluido refrigerante na entrada do compressor;
11. Temperatura na saída do compressor;
12. Pressão do fluido refrigerante na saída do compressor;
13. Temperatura na saída do condensador;
14. Pressão do fluido refrigerante na saída do condensador;
15. Temperatura na entrada do evaporador estático;
16. Pressão do fluido refrigerante na entrada do evaporador estático.

Nas medições feitas no circuito de fluido refrigerante, considera-se a influência do óleo lubrificante ao se misturar com o fluido refrigerante. Segundo explicado por Dang et al. (2007) e Al-Rashed (2011) as medições quanto de potência de compressão e pressão tem um aumento devido ao escoamento da mistura óleo–refrigerante, e é por isso que pode observar-se uma degradação do COP da máquina de refrigeração.

Esta metodologia tem o fim de caracterizar sob baixas condições reais de radiação solar o, funcionamento de uma BDC com evaporador estático como dispositivo de apoio a um coletor solar.

### 3.13 Incertezas das medições

Nesta seção, aborda-se o procedimento para realizar uma estimativa das incertezas dos parâmetros medidos e sua propagação nos parâmetros calculados. A determinação das incertezas das medidas experimentais foi realizada usando-se a metodologia descrita por Albertazzi e Sousa (2008), na qual a incerteza expandida é definida em um intervalo de confiança de 95%, incluindo-se especificações técnicas dos instrumentos fornecidos pelos fabricantes, a calibração feita em campo e os efeitos do sistema de aquisição de dados. A TAB 3.3 apresenta as incertezas associadas aos parâmetros independentes obtidos nos ensaios experimentais ou pelas incertezas dadas pelos fabricantes. Uma descrição mais detalhada da calibração e incertezas dos instrumentos de temperatura é apresentada no ANEXO C.

TABELA 3.3

Incertezas expandidas dos parâmetros medidos.

NOME	INCERTEZA
Resistência elétrica	$\pm(0,4\% + 10d)**$
Pressão manométrica	$\pm 1,6\%*$
Temperatura	Ver ANEXO C

FONTE – AUTOR. \*do valor lido. \*\* do valor lido e d= menor caixa significativa medida (medição feita em multímetro ICEL MD 6300).

Alguns parâmetros  $y$  foram calculados como uma função de uma ou mais variáveis medidas diretamente,  $X_i$ , de modo que  $y = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$ . Para esse caso, a incerteza é calculada usando-se a teoria de Taylor (2009) que propôs a seguinte expressão para calcular a propagação das incertezas,  $U_y$ , com base nas incertezas experimentais,  $U_{X_i}$ :

$$U_y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial X_i}\right)^2 U_{X_i}^2} \quad (3.10)$$

Utilizando o procedimento descrito acima, na TAB 3.4 apresenta-se a incerteza do parâmetro estimado.

TABELA 3.4

Cálculo da incerteza combinada do protótipo na medição do COP

<b>Variable ± Uncertainty</b>	<b>Partial derivative</b>
<u>COP = 2,166 ± 0,4714</u>	
E = 0,1633 ± 0,001633	$\partial \text{COP} / \partial E = -13,27$
m = 200 ± 10	$\partial \text{COP} / \partial m = 0,01083$
t1 = 41 ± 0,6	$\partial \text{COP} / \partial t1 = -0,5401$
t2 = 45,01 ± 0,6	$\partial \text{COP} / \partial t2 = 0,5401$

Para a realização do cálculo do COP, foram utilizados os seguintes instrumentos e suas respectivas incertezas:

- Sensor de temperatura termopar tipo T, incerteza da medição  $\pm 0,6^\circ\text{C}$ .
- Medidor de energia digital do fabricante Kron, modelo MKE-01, incerteza da medição  $\pm 1\%$ .
- Becker de vidro graduado em 1000 ml do fabricante Deltex, (usada para calibrar o reservatório) incerteza da medição  $\pm 5\%$ .

Os valores das incertezas foram fornecidos pelos fabricantes.

### 3.14 Considerações finais.

Neste capítulo descreveu-se a importância de parâmetros que são envolvidos no aproveitamento da energia solar. Foi fundamental o uso das bases de dados solarimétricos do Brasil para conseguir valores reais diários dessa energia.

O cálculo da potência utilizada na simulação incluiu fatores importantes como a reflexão da radiação, perdas de radiação e calor no painel solar padrão, parâmetros de eficiência e das propriedades termodinâmicas do fluido utilizado (água). Tudo com a finalidade de ter resultados experimentais mais próximos de um sistema real. Também, teve-se uma breve

descrição do protótipo usado, bem como dispositivos mecânicos, de controle, elétricos e eletromecânicos.

Por último, a descrição dos algoritmos computacionais que forma parte da ferramenta de simulação, também do método para a execução dos ensaios experimentais e cálculo das incertezas dos instrumentos de medida.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises do comportamento do conjunto coletor solar e BDC para a cidade de estudo. No decorrer deste capítulo, são analisadas propriedades importantes como o coeficiente de performance da BDC, o consumo médio de energia pelo sistema de apoio nos meses utilizado, temperaturas máximas da água e comportamento e validação do simulador de coletor solar.

### 4.1 Análise do comportamento do consumo de água.

O consumo diário em uma casa padrão é ilustrado no GRA. 4.1, foi esboçado segundo a caracterização dos dados da seção 3.3.

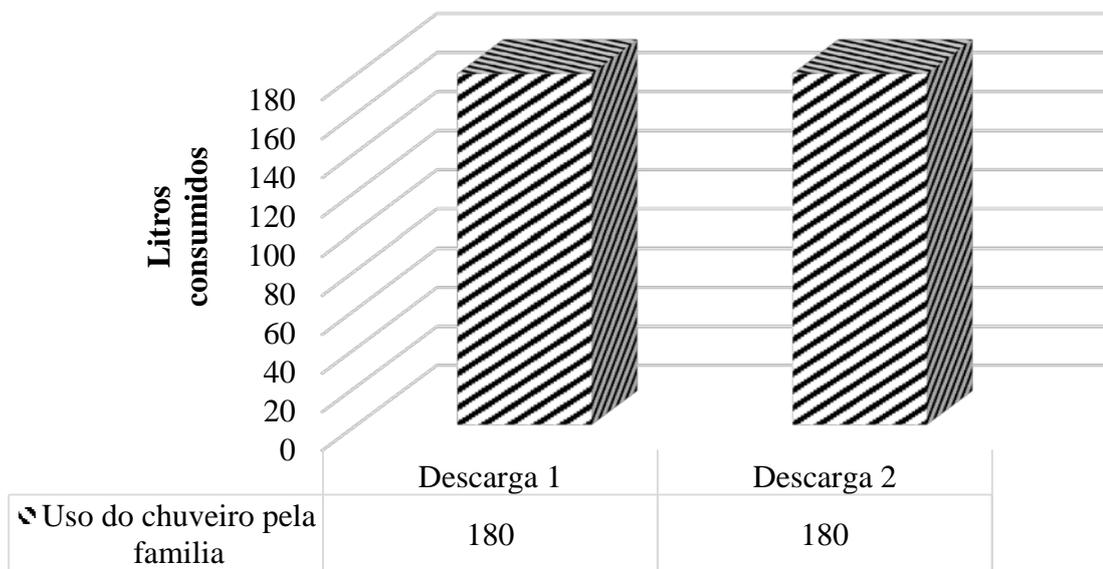


GRÁFICO 4.1 – Comportamento das descargas de água.

FONTE – AUTOR.

O GRA. 4.1 determinou o tempo de abertura e fechamento das válvulas de saída e entrada da água no reservatório.

### 4.2 Análise dos dados de radiação solar.

A avaliação dos dados disponibilizados pelo software Radiasol<sup>®</sup> (*Labsol*, 2014) permitiu ilustrar os comportamentos da radiação global horária média mensal na horizontal que atinge a região e também agrupar as contribuições médias da radiação solar. Os dados foram agrupados baixo as mudanças sazonais.

Porém, os comportamentos são ilustrados da seguinte maneira:

- GRA 4.2, radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de janeiro, fevereiro e março.
- GRA 4.3, radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de abril, maio e junho.
- GRA 4.4, radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de julho, agosto e setembro.
- GRA 4.5, radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de outubro, novembro e dezembro.

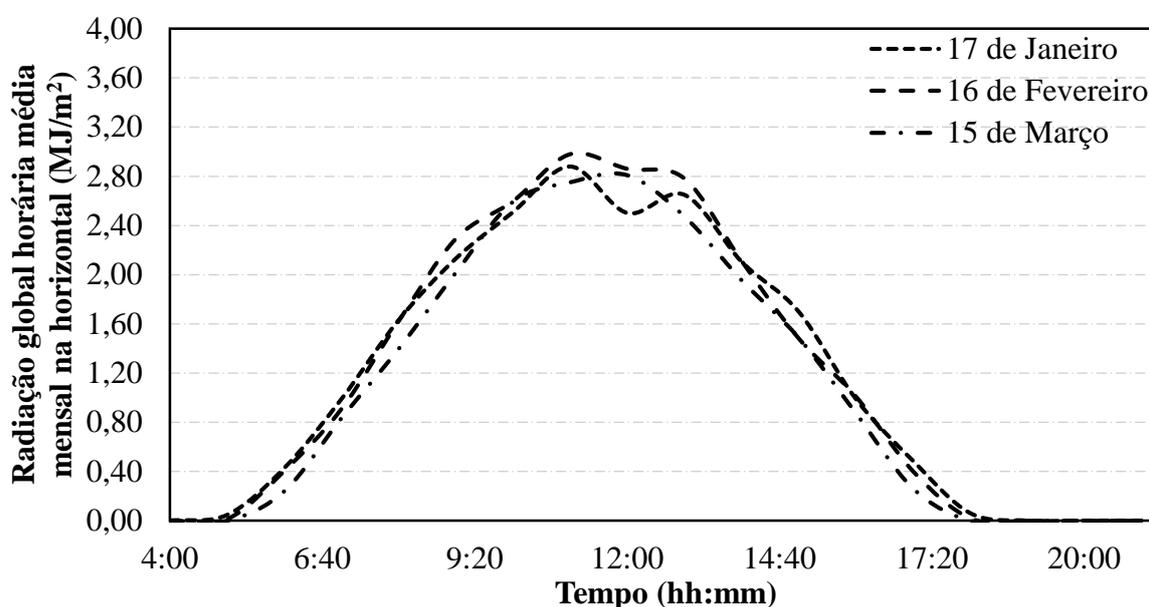


GRÁFICO 4.2 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de janeiro, fevereiro e março.

FONTE – AUTOR.

A energia atingida na cidade no período do 21 de dezembro até o 20 de março foi representada assim: do dia 21 até o dia 31 de dezembro, que é a primeira semana de verão, na cidade atingiu um total de  $194,04 \text{ MJm}^{-2}$  ( $19,40 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), no mês de janeiro obteve-se  $654,64 \text{ MJm}^{-2}$  ( $21,10 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), que é um valor típico da estação de verão. Fevereiro contribuiu com  $602,40 \text{ MJm}^{-2}$  ( $21,50 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ) e o valor de  $394,05 \text{ MJm}^{-2}$  ( $19,70 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ) nos primeiros 20 dias do mês de março.

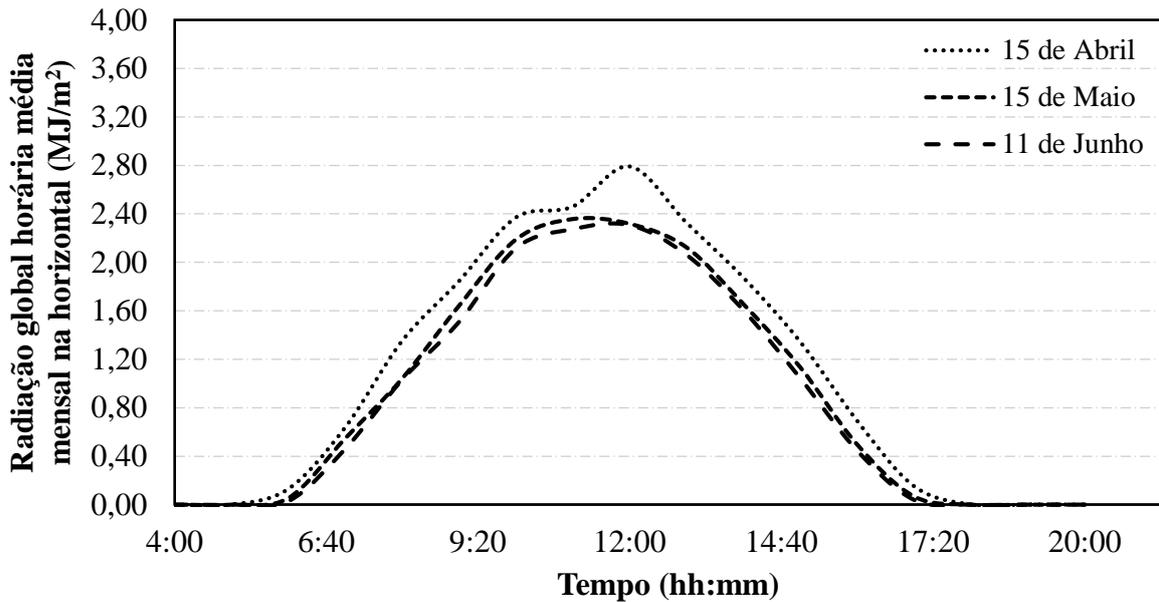


GRÁFICO 4.3 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de abril, maio e junho.

FONTE – AUTOR.

Estudando o GRA. 4.3, a energia atingida na cidade de Belo Horizonte no período do dia 21 de março até o 20 de junho expressou-se da seguinte forma: do dia 21 até o dia 31 de março atingiu  $197,03 \text{ MJm}^{-2}$  ( $19,70 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), no mês de abril obteve-se  $538,92 \text{ MJm}^{-2}$  ( $17,96 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), maio contribuiu com  $484,56 \text{ MJm}^{-2}$  ( $15,63 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ) e o valor de  $298,72 \text{ MJm}^{-2}$  ( $14,93 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ) nos primeiros 20 dias de junho.

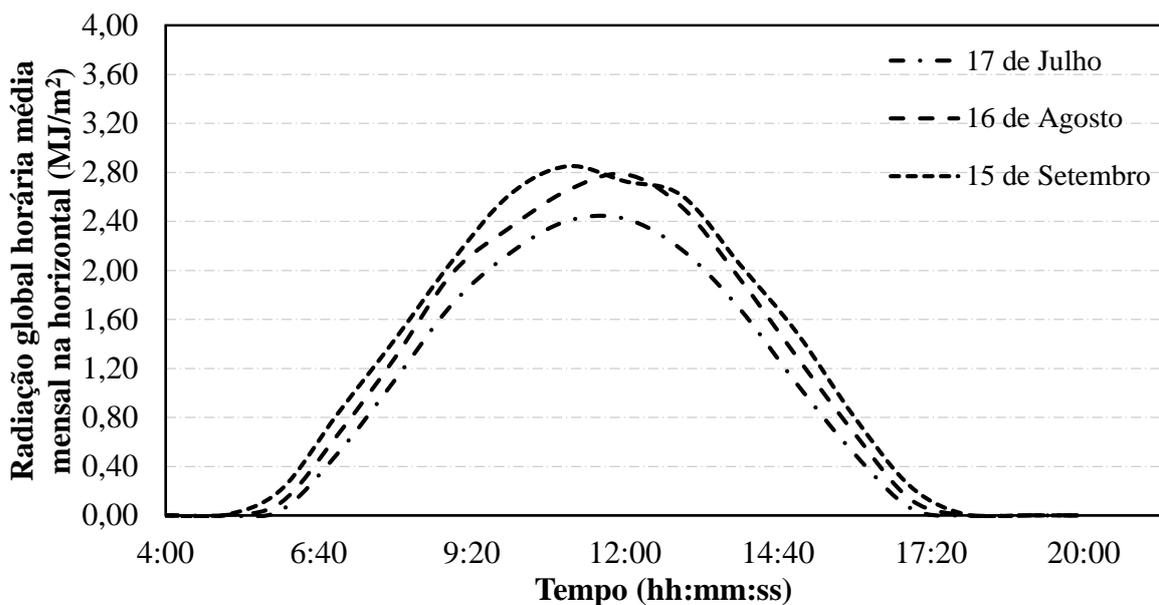


GRÁFICO 4.4 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de julho, agosto e setembro.

FONTE – AUTOR.

A energia atingida representada no GRA. 4.4 contém os valores do período do dia 21 de junho até o 21 de setembro. Do dia 21 até o dia 30 de junho, Belo Horizonte recebeu um valor líquido de  $149,36 \text{ MJm}^{-2}$  ( $14,26 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), no mês de julho obteve-se  $492,49 \text{ MJm}^{-2}$  ( $15,88 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), agosto com  $569,27 \text{ MJm}^{-2}$  ( $18,36 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ) e nos primeiros 21 dias de setembro a radiação na cidade foi  $418,74 \text{ MJm}^{-2}$  ( $19,94 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ). Pode-se observar que neste período é predominante radiações incidentes baixas devido ao posicionamento do sol no hemisfério norte.

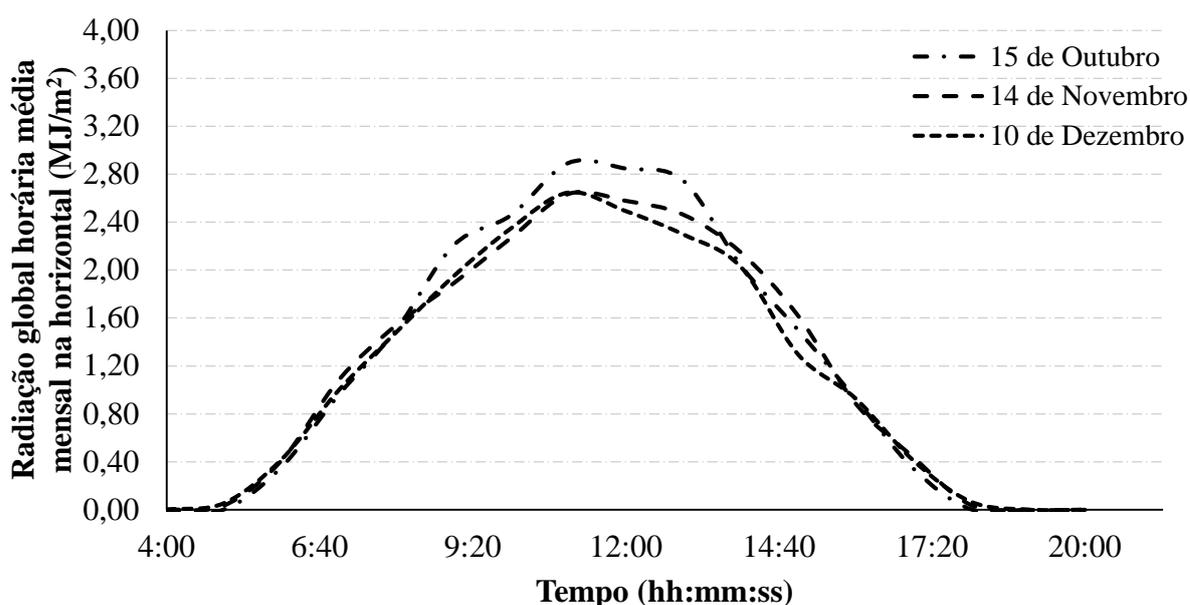


GRÁFICO 4.5 – Radiação global horária média mensal na horizontal no dia médio dos meses de outubro, novembro e dezembro

FONTE – AUTOR.

O GRA. 4.5 ilustra o comportamento do período de primavera, presente no Brasil desde o 22 de setembro até o 20 de dezembro. A energia atingida é representada pelos seguintes valores: do dia 22 até o dia 30 de setembro Belo Horizonte obteve  $179,46 \text{ MJm}^{-2}$  ( $19,94 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), no mês de outubro obteve-se  $645,71 \text{ MJm}^{-2}$  ( $20,82 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), novembro com  $601,34 \text{ MJm}^{-2}$  ( $20,04 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ). Os valores de radiação do mês de outubro e novembro são caracteristicamente altos devido à baixa quantidade de nuvens. Por último, nos primeiros 20 dias de dezembro a radiação alcançou  $388,08 \text{ MJm}^{-2}$  ( $19,40 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ).

A TAB. 4.1 agrupa os valores da radiação global horária média mensal e da radiação global diária média mensal que atinge uma superfície horizontal nos doze meses do ano. Estes valores foram os aplicados nas simulações do componente a testar.

TABELA 4.1

Distribuição da radiação global horária média mensal e da radiação global diária média mensal que atinge uma superfície horizontal nos doze meses avaliados, cidade Belo Horizonte – MG.

HORA	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$\bar{I}_n$ [MJ/m <sup>2</sup> ]											
<b>04:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>05:00</b>	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05
<b>06:00</b>	0,43	0,41	0,24	0,13	0,05	0,03	0,04	0,10	0,21	0,36	0,41	0,42
<b>07:00</b>	0,99	0,91	0,84	0,64	0,55	0,46	0,51	0,66	0,83	0,96	1,08	1,00
<b>08:00</b>	1,63	1,62	1,40	1,35	1,04	1,03	1,11	1,29	1,44	1,50	1,54	1,48
<b>09:00</b>	2,13	2,29	2,02	1,84	1,64	1,51	1,73	1,98	2,08	2,21	1,89	1,95
<b>10:00</b>	2,51	2,60	2,59	2,37	2,19	2,12	2,14	2,35	2,62	2,46	2,27	2,35
<b>11:00</b>	2,88	2,98	2,75	2,46	2,36	2,28	2,40	2,65	2,85	2,89	2,64	2,65
<b>12:00</b>	2,50	2,86	2,81	2,79	2,32	2,31	2,42	2,79	2,73	2,85	2,58	2,49
<b>13:00</b>	2,65	2,78	2,47	2,33	2,12	2,06	2,17	2,52	2,61	2,75	2,46	2,30
<b>14:00</b>	2,11	2,11	1,95	1,87	1,66	1,61	1,69	1,93	2,05	2,04	2,15	2,03
<b>15:00</b>	1,70	1,48	1,49	1,34	1,13	1,04	1,07	1,29	1,49	1,50	1,62	1,30
<b>16:00</b>	0,99	1,01	0,87	0,69	0,50	0,45	0,50	0,67	0,80	0,93	0,89	0,93
<b>17:00</b>	0,49	0,40	0,26	0,15	0,07	0,04	0,05	0,12	0,23	0,35	0,44	0,41
<b>18:00</b>	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07
<b>19:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>20:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\bar{H}_n$ [MJ/m <sup>2</sup> dia]											
	21,11	21,51	19,69	17,96	15,63	14,93	15,84	18,35	19,94	20,80	20,05	19,41

FONTE – (Labsol, 2014)

### 4.3 Resultado dos ensaios.

A partir do uso dos dados da TAB. 4.1 como base de dados dos dias médios do ano no algoritmo de simulação e transferindo os valores equivalentes da radiação absorvida pela placa em potência elétrica para o coletor solar simulador obtiveram-se os seguintes resultados:

#### 4.3.1 Comparação da radiação global diária média mensal em diferentes inclinações.

O GRA. 4.6 mostrou o ganho que consegue-se obter na coleta da radiação solar com a variação da inclinação do painel coletor.

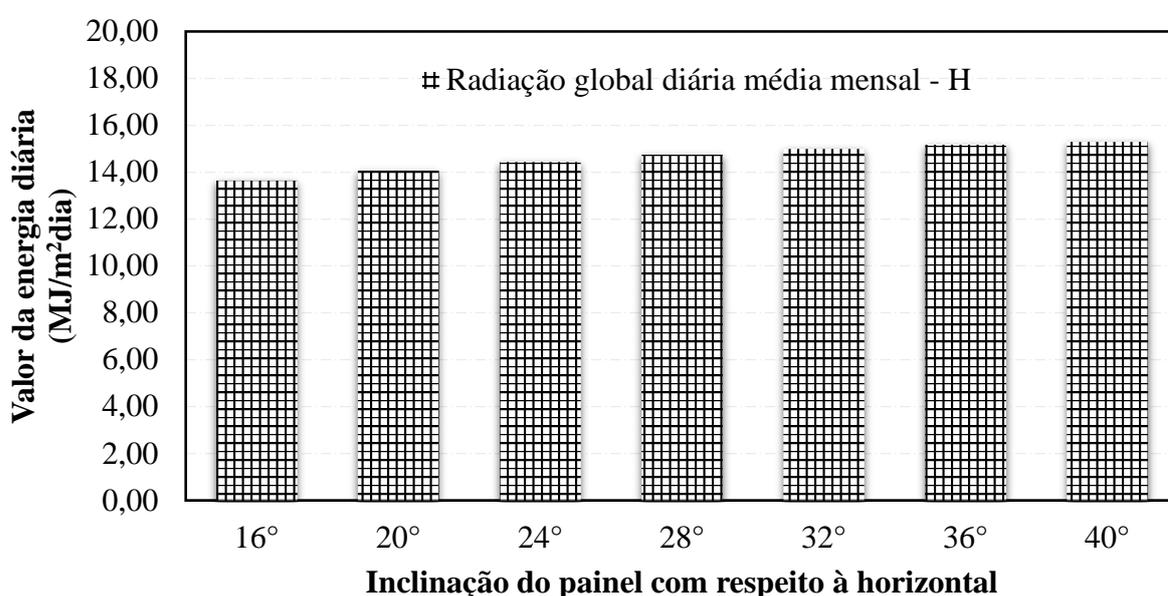


GRÁFICO 4.6 – Variação da radiação global diária média mensal para o mês de Julho com diferentes valores de inclinação no painel de simulação.

FONTE – AUTOR.

Como foi descrito por Duffie e Beckman (2013), para a máxima disponibilidade do verão, a inclinação deve ser aproximadamente  $10^\circ$  a  $15^\circ$  menor do que a latitude da localidade. Diferente para a máxima disponibilidade de energia no inverno, onde a inclinação deve ser de aproximadamente  $10^\circ$  a  $15^\circ$  mais do que a latitude. Por esse fato, conhecendo a latitude da cidade de Belo Horizonte, o valor recomendado usado nas simulações foi  $36^\circ$ N.

#### 4.3.2 Radiação global, fração difusa e fração direta diária e horária média mensal no painel inclinado de simulação.

A radiação global diária média mensal no plano inclinado determinou a magnitude máxima diária da energia que pode ser capturada em um coletor solar na cidade usando uma

inclinação no painel igual a  $36^\circ\text{N}$ . Desse valor de radiação também foi obtido o valor da fração diária média mensal da radiação difusa e a fração diária média mensal da radiação direta. Os três componentes de energia solar são apresentados no GRA. 4.7.

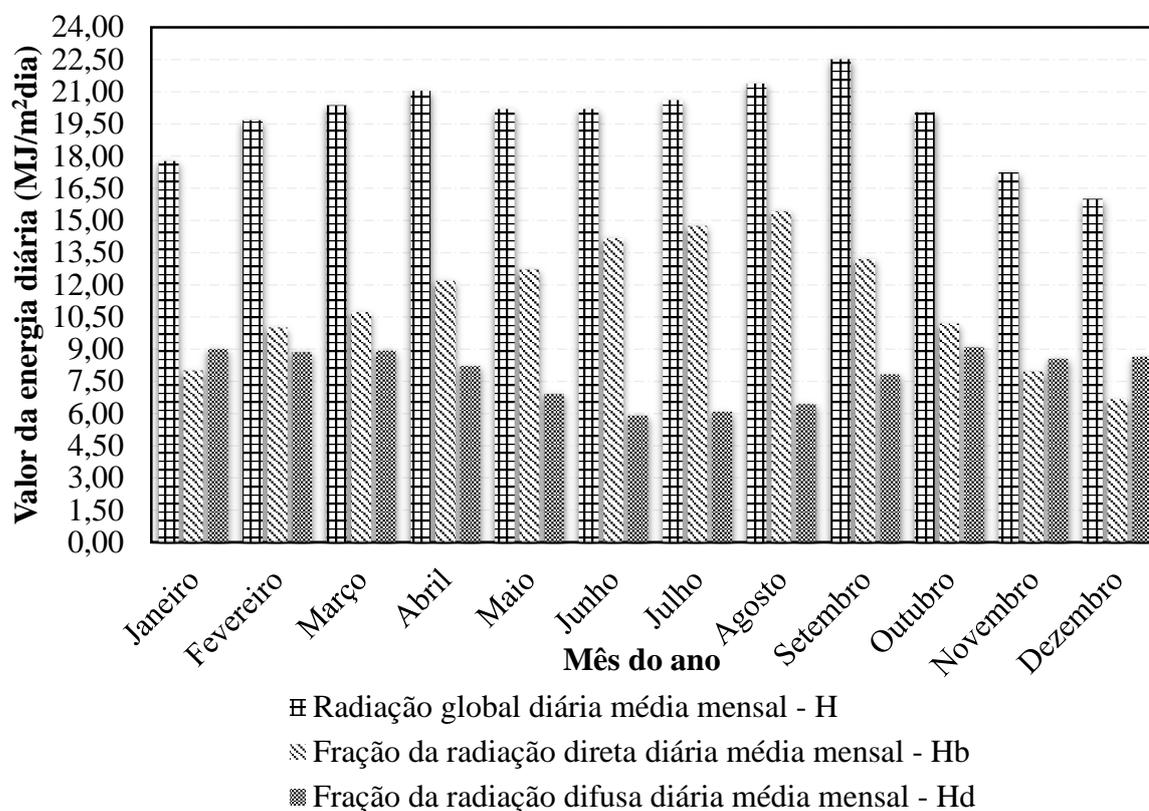


GRÁFICO 4.7 – Radiação global, fração difusa e fração direta diária média mensal no plano inclinado de simulação.

FONTE – AUTOR.

O GRA. 4.7 demonstrou que a inclinação utilizada nesse estudo contribuiu de forma eficiente na captação da energia no período de inverno, meses onde observa-se o maior consumo de energia elétrica residencial pelo uso do chuveiro elétrico. Esta contribuição foi obtida como consequência da alta magnitude na fração da radiação direta diária média mensal devido à perpendicularidade da declinação solar, o que beneficiou no aquecimento da água pelo uso da energia alternativa.

Por outro lado, as simulações diárias na modelagem matemática do algoritmo computacional foram feitas com os valores atribuídos à distribuição da radiação global horária média mensal na horizontal em cada mês de avaliação (TAB. 4.1). Os resultados foram agrupados em três tipos de distribuições. A distribuição da radiação horária média mensal no plano inclinado (TAB. 4.2), a distribuição da radiação direta horária média mensal no plano

inclinado (TAB. 4.3) e a distribuição da radiação difusa horária média mensal no plano inclinado (TAB 4.4), onde observou-se os ganhos significativos na radiação global média diária no plano inclinado nos meses de março até setembro. O maior dos ganhos foi obtido no mês de junho com uma radiação  $5,27 \text{ MJ/m}^2$  maior do que a radiação global diária média mensal na horizontal. É importante destacar que a análise dos dados determinou que o equipamento auxiliar do conjunto coletor solar foi avaliado baixo o uso das melhores condições de radiação solar captada por um protótipo similar, já que se o estudo tivesse sido feito com outra inclinação, não fosse-se aproveitado toda a possível energia solar.

#### 4.3.3 Nebulosidade mensal simulada.

A partir do conhecimento da radiação extraterrestre sobre a superfície horizontal ( $I_0$ ) e o valor da radiação global diária média mensal ( $H$ ), conseguiu-se determinar o fator de nebulosidade que faz o espalhamento dos raios incidentes no coletor solar, fato que determina perdas na captação da energia total. O GRA. 4.8 mostrou o comportamento médio mensal das nuvens nos ensaios. O parâmetro de nebulosidade foi avaliado como 1,00 para dia de céu totalmente nublado e 0,00 para céu limpo.

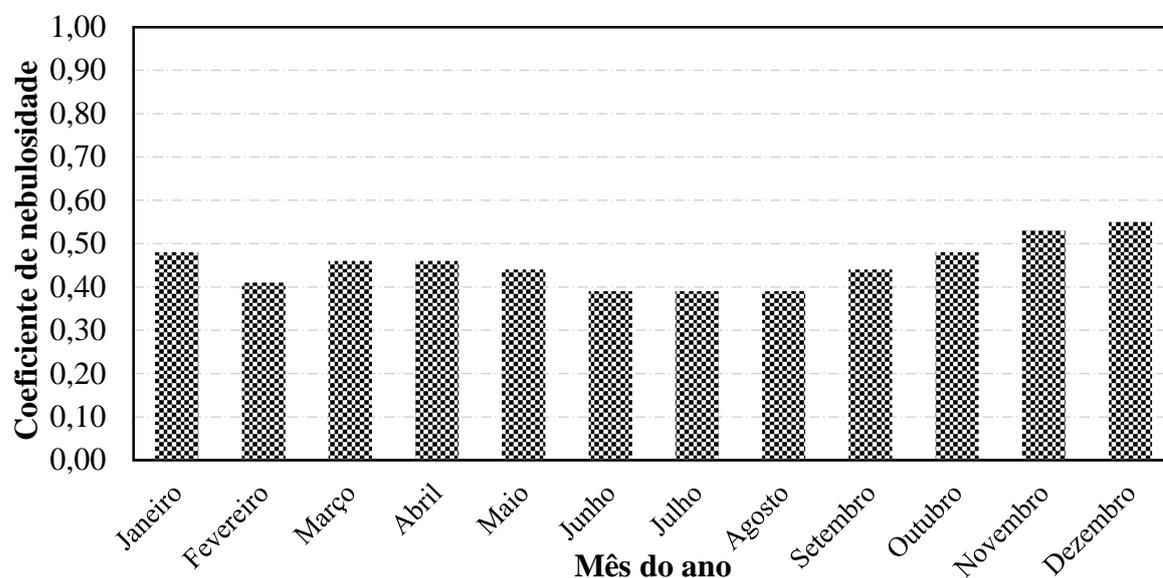


GRÁFICO 4.8 – Quantidade de nuvens avaliadas nos dias de simulação.

FONTE – AUTOR.

De acordo com o GRA. 4.8 a máxima nebulosidade encontrou-se no mês de janeiro, novembro e dezembro, dias onde é característico grandes períodos de chuvas. A estação seca do

ano, representados pelos meses de junho, julho e agosto, a quantidade de nuvens foi baixa, sendo inferior a 39%.

#### 4.3.4 Índice horário médio de claridade simulado.

O QUADRO 4.1 agrupa os valores do índice de claridade médio mensal. Este índice foi usado na avaliação dos modelos matemáticos implementados, pois ele possibilitou a comparação com os valores encontrados na literatura. Os valores comparados foram os achados no atlas solarimétrico de Minas Gerais (Cemig, 2011) e na base de dados de SUNDATA (Censolar, 1993).

QUADRO 4.1

Parâmetros de comparação entre índices de claridade médios mensais

<b>MÊS</b>	<b>K<sub>T</sub> Atlas Solarimétrico (Cemig, 2011)</b>	<b>K<sub>T</sub> SUNDATA (Censolar, 1993)</b>	<b>K<sub>T</sub> SIMULADO (I/I<sub>0</sub>)</b>	<b>%erro</b>
<b>Janeiro</b>	0,39	0,51	0,49	20,4%/4,1%
<b>Fevereiro</b>	0,45	0,54	0,52	13,5%/3,8%
<b>Março</b>	0,44	0,54	0,54	18,5%/0,0%
<b>Abril</b>	0,48	0,58	0,54	11,1%/7,4%
<b>Mai</b>	0,53	0,59	0,56	5,3%/5,3%
<b>Junho</b>	0,42	0,62	0,61	31,1%/1,6%
<b>Julho</b>	0,56	0,64	0,61	8,2%/4,9%
<b>Agosto</b>	0,48	0,63	0,61	21,3%/3,3%
<b>Setembro</b>	0,44	0,58	0,57	22,8%/1,7%
<b>Outubro</b>	0,47	0,54	0,52	9,6%/3,8%
<b>Novembro</b>	0,39	0,49	0,47	17,0%/4,2%
<b>Dezembro</b>	0,38	0,47	0,45	15,5%/4,4%

FONTES – AUTOR.

A análise do QUADRO 4.1 permitiu conhecer que a modelagem matemática representou bem os índices de claridade mensais, conseguindo valores muito perto e em um caso igual dos encontrados na base de dados da SUNDATA (Censolar, 1993). Por outro lado, o erro médio foi de 3,7% para SUNDATA da Censolar (1993) e 14,5% em comparação ao Atlas Solarimétrico da Cemig (2011).

#### 4.3.5 Radiação diária e horária média mensal total absorvida e perdas associadas.

O desempenho do coletor requereu informação sobre a energia solar absorvida pela placa coletora. A energia solar incidente relacionada na TAB. 4.2 foi utilizada nas suas três distribuições espaciais: o feixe direto, a radiação difusa, e de radiação refletida do solo.

O tratamento dos componentes permitiu determinar a quantidade de energia diária e horária absorvida pela placa e transferida para a água. A TAB. 4.5 agrupa os valores totais diários e horários da radiação absorvida.

A partir da comparação dos valores diários registrados na TAB 4.5 foi possível observar que nos meses de inverno, onde a temperatura da água que sai da torneira é mais baixa do que as outras estações sazonais, obteve-se maior absorção de radiação solar e posteriormente transformação da energia solar em energia de aquecimento da água.

Por outra parte, conseguiu-se determinar os valores das perdas no processo de captação da energia. A TAB. 4.6 agrupa a diferença entre a radiação diária absorvida -  $\bar{S}$  (TAB. 4.5) e a radiação diária solar incidente no painel -  $\bar{H}$  (TAB 4.2). Pela temperatura ambiente atingir os valores mais baixos nos meses de inverno, as perdas da energia aumentaram, devido a que a transferência de calor entre o ambiente e o vidro da cobertura é maior. Com isso, o sistema precisa além da energia para aquecer a água, um adicional para compensar estas perdas.

TABELA 4.2

Perdas de energia solar registrada no processo de simulação

<b>MÊS</b>	<b><math>U_T</math> [MJ/m<sup>2</sup>dia]</b>
Janeiro	6,22
Fevereiro	6,46
Março	5,57
Abril	6,56
Mai	6,31
Junho	5,78
Julho	5,44
Agosto	5,46
Setembro	7,44
Outubro	5,85
Novembro	4,59
Dezembro	4,21

FONTE – AUTOR.

Também foi possível observar com a comparação dos valores da TAB. 4.5 e as TAB. 4.3 e 4.4 que nos meses em que a radiação difusa média horária no plano inclinado tinha uma magnitude maior do que a componente direta, a radiação absorvida foi também reduzida, já que no comportamento térmico dos coletores solares a parcela mais aproveitada é a parcela direta da energia incidente. Em alguns dos casos, a captação da energia difusa atingiu só a metade da disponível.

RESULTADOS E ANÁLISES

TABELA 4.3

Distribuição da radiação global diária e horária média mensal em um painel inclinado 36° em cada mês de avaliação, cidade Belo Horizonte.

HORA	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$\bar{I}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]											
04:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00	0,26	0,27	0,22	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,27	0,25	0,24
07:00	0,76	0,78	0,84	0,76	0,82	0,82	0,78	0,82	0,89	0,86	0,81	0,71
08:00	1,35	1,43	1,42	1,60	1,39	1,39	1,50	1,58	1,62	1,42	1,30	1,21
09:00	1,82	2,10	2,08	2,16	2,13	2,13	2,08	2,34	2,43	2,10	1,66	1,62
10:00	2,21	2,46	2,71	2,76	2,80	2,80	2,86	2,83	2,85	2,47	2,07	2,06
11:00	2,57	2,84	2,90	2,89	3,00	3,00	3,03	3,15	3,20	2,88	2,42	2,29
12:00	2,28	2,73	2,97	3,24	2,94	2,94	3,08	3,18	3,35	2,84	2,32	2,17
13:00	2,29	2,60	2,58	2,69	2,71	2,71	2,78	2,87	3,05	2,68	2,20	2,04
14:00	1,82	1,98	2,04	2,19	2,15	2,15	2,22	2,28	2,38	1,99	1,88	1,71
15:00	1,39	1,32	1,51	1,58	1,52	1,52	1,54	1,52	1,62	1,42	1,37	1,06
16:00	0,76	0,87	0,86	0,84	0,73	0,73	0,75	0,84	0,89	0,84	0,71	0,66
17:00	0,28	0,28	0,25	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,27	0,26	0,23
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\bar{H}$ [MJ/m <sup>2</sup> dia]											
	17,77	19,67	20,38	21,04	20,19	20,19	20,61	21,39	22,52	20,04	17,25	16,01

FONTE – AUTOR.

RESULTADOS E ANÁLISES

TABELA 4.4

Distribuição da fração direta diária e horária média mensal em um painel inclinado 36° em cada mês de avaliação, cidade Belo Horizonte.

HORA	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$\bar{I}_b$ [MJ/m <sup>2</sup> ]											
04:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00	0,01	0,04	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,05	0,02	0,00
07:00	0,20	0,23	0,28	0,32	0,44	0,44	0,46	0,46	0,41	0,32	0,31	0,21
08:00	0,52	0,68	0,64	0,89	0,76	0,95	0,98	1,02	0,82	0,60	0,53	0,41
09:00	0,85	1,16	1,17	1,18	1,31	1,39	1,64	1,71	1,37	1,21	0,74	0,73
10:00	1,11	1,33	1,52	1,71	1,98	2,09	1,98	1,97	1,90	1,20	0,95	0,93
11:00	1,38	1,65	1,71	1,62	2,06	2,18	2,30	2,24	2,08	1,67	1,25	1,23
12:00	1,04	1,59	1,71	2,18	1,89	2,22	2,33	2,55	1,88	1,63	1,32	1,10
13:00	1,30	1,56	1,47	1,72	1,76	1,96	2,03	2,22	1,85	1,61	1,16	0,82
14:00	0,82	0,94	1,00	1,19	1,32	1,49	1,55	1,59	1,39	0,95	0,93	0,74
15:00	0,57	0,54	0,74	0,90	0,85	1,02	0,96	1,02	0,92	0,62	0,57	0,31
16:00	0,19	0,26	0,39	0,36	0,35	0,41	0,50	0,47	0,40	0,30	0,17	0,18
17:00	0,01	0,04	0,07	0,09	0,00	0,00	0,00	0,11	0,10	0,05	0,02	0,00
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\bar{H}_b$ [MJ/m <sup>2</sup> dia]											
	8,00	10,01	10,74	12,19	12,72	14,16	14,75	15,43	13,20	10,19	7,96	6,67

FONTE – AUTOR.

RESULTADOS E ANÁLISES

TABELA 4.5

Distribuição da fração difusa diária e horaria média mensal em um painel inclinado 36° em cada mês de avaliação, cidade Belo Horizonte.

HORA	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$\bar{I}_d$ [MJ/m <sup>2</sup> ]											
<b>04:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>05:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>06:00</b>	0,23	0,22	0,17	0,09	0,00	0,00	0,00	0,03	0,16	0,21	0,22	0,23
<b>07:00</b>	0,52	0,51	0,53	0,43	0,36	0,32	0,34	0,40	0,46	0,51	0,47	0,46
<b>08:00</b>	0,77	0,69	0,73	0,67	0,59	0,51	0,56	0,56	0,68	0,77	0,72	0,75
<b>09:00</b>	0,89	0,86	0,84	0,91	0,77	0,63	0,64	0,66	0,81	0,80	0,85	0,82
<b>10:00</b>	1,01	1,03	1,10	0,96	0,74	0,69	0,77	0,80	0,86	1,18	1,04	1,05
<b>11:00</b>	1,08	1,08	1,09	1,18	0,85	0,77	0,75	0,86	0,93	1,11	1,07	0,96
<b>12:00</b>	1,14	1,03	1,16	0,96	0,96	0,77	0,75	0,69	1,02	1,10	0,90	0,98
<b>13:00</b>	0,89	0,94	1,03	0,89	0,87	0,74	0,76	0,74	0,91	0,96	0,96	1,13
<b>14:00</b>	0,92	0,96	0,97	0,93	0,77	0,67	0,67	0,72	0,76	0,97	0,87	0,90
<b>15:00</b>	0,76	0,73	0,71	0,64	0,63	0,48	0,52	0,55	0,65	0,75	0,74	0,70
<b>16:00</b>	0,54	0,58	0,44	0,45	0,36	0,32	0,32	0,40	0,44	0,51	0,50	0,45
<b>17:00</b>	0,26	0,23	0,17	0,09	0,00	0,00	0,00	0,03	0,15	0,21	0,22	0,22
<b>18:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>19:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>20:00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\bar{H}_d$ [MJ/m <sup>2</sup> dia]											
	9,01	8,87	8,93	8,21	6,91	5,91	6,08	6,44	7,83	9,09	8,56	8,64

FONTE – AUTOR.

RESULTADOS E ANÁLISES

TABELA 4.6

Distribuição da radiação diária e horária absorvida pela placa absorvedora em um painel inclinado 36° no dia médio de cada mês, cidade Belo Horizonte.

HORA	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$S$ [MJ/m <sup>2</sup> ]											
04:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00	0,17	0,18	0,14	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,20	0,25	0,27
07:00	0,48	0,49	0,53	0,52	0,44	0,42	0,43	0,55	0,52	0,54	0,52	0,56
08:00	0,86	0,92	0,98	0,91	0,96	0,86	1,04	1,01	1,04	1,03	0,90	0,87
09:00	1,18	1,40	1,50	1,56	1,44	1,55	1,54	1,57	1,60	1,51	1,23	1,26
10:00	1,45	1,68	2,05	2,06	2,01	2,02	2,16	2,17	2,03	1,77	1,59	1,52
11:00	1,69	1,97	2,20	1,99	2,13	2,30	2,42	2,45	2,25	2,03	1,78	1,66
12:00	1,51	1,88	2,27	2,24	2,22	2,19	2,44	2,55	2,28	2,12	1,81	1,65
13:00	1,50	1,78	1,92	1,93	1,92	2,06	2,08	2,32	2,00	1,80	1,62	1,40
14:00	1,18	1,32	1,47	1,67	1,37	1,57	1,61	1,73	1,60	1,43	1,37	1,33
15:00	0,87	0,86	1,04	0,92	0,97	1,00	0,98	1,06	1,07	1,01	0,97	0,91
16:00	0,48	0,54	0,54	0,48	0,44	0,44	0,47	0,53	0,52	0,56	0,57	0,54
17:00	0,19	0,18	0,15	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,19	0,25	0,27
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\bar{S}$ [MJ/m <sup>2</sup> dia]											
	11,55	13,21	14,80	14,48	13,89	14,41	15,17	15,93	15,17	14,19	12,85	12,23

FONTE – AUTOR.

#### 4.3.6 Comportamento térmico no coletor simulado.

Os pontos de aquisição da temperatura dentro do coletor simulado podem-se observar na FIG.4.1.

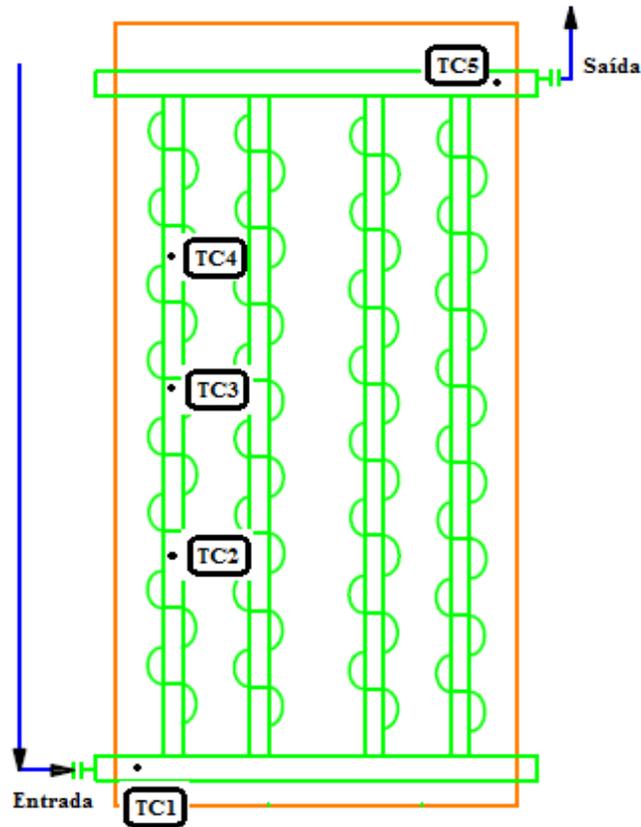


FIGURA 4.1 – Posicionamento dos termopares no coletor solar simulador.

FONTE – AUTOR.

A TAB. 4.7 mostra os resultados da simulação para o dia 17 de janeiro (ver também anexo A). O comportamento térmico horário do coletor simulador é ilustrado no GRA. 4.9. Comparou-se o resultado da simulação desse dia com os resultados obtidos em pesquisas donde eram usados coletores solares reais com o objetivo de conseguir avaliar se o coletor simulador comportou-se igual ou diferente de coletores solares reais.

Comparando os resultados da pesquisa de Rajaseenivasan, Raja e Srithar (2014) conseguiu-se observar que o coletor simulador teve um comportamento muito similar a um coletor real.

TABELA 4.7

Resultados experimentais da simulação – Mês de janeiro.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	23,15	26,51	25,13	26,71	27,84	28,37	27,00	0,86	0,40	1,35	48,3
08:30	23,15	26,56	25,09	26,48	27,62	29,24	29,11	0,86	0,40	1,35	48,3
09:00	23,15	26,67	25,15	28,54	30,96	34,23	31,55	1,18	0,36	1,82	75,3
09:30	23,15	27,66	25,33	28,62	31,51	36,21	36,34	1,18	0,36	1,82	75,3
10:00	23,15	28,52	25,53	29,74	33,50	39,51	38,69	1,45	0,38	2,21	102,0
10:30	23,15	30,15	25,76	30,03	34,06	40,95	41,19	1,45	0,38	2,21	102,0
11:00	23,15	31,64	26,11	31,58	36,80	45,66	44,99	1,69	0,45	2,57	119,2
11:30	23,15	34,38	27,05	32,57	38,13	47,85	48,34	1,69	0,45	2,57	119,2
12:00	23,15	36,80	28,51	33,75	39,10	48,11	48,93	1,51	0,49	2,28	134,2
12:30	23,15	38,67	30,19	35,33	40,41	49,26	49,69	1,51	0,49	2,28	134,2
13:00	23,15	40,56	32,20	37,36	42,51	51,16	51,47	1,50	0,55	2,29	132,3
13:30	23,15	42,47	34,34	39,44	44,49	52,98	53,43	1,50	0,55	2,29	132,3
14:00	23,15	44,38	36,34	40,22	43,97	50,35	51,67	1,18	0,59	1,82	119,5
14:30	23,15	44,89	37,59	41,30	44,65	50,03	50,04	1,18	0,59	1,82	119,5
15:00	23,15	45,49	38,86	41,01	42,96	46,34	48,07	0,87	0,65	1,39	81,1
15:30	23,15	45,33	38,90	41,01	42,66	44,93	44,26	0,87	0,65	1,39	81,1
16:00	23,15	45,16	39,46	40,62	41,75	43,62	44,08	0,48	0,55	0,76	39,5
16:30	23,15	45,01	37,55	39,50	41,02	42,27	40,07	0,48	0,55	0,76	39,5
17:00	23,15	45,03	36,55	38,52	40,09	41,01	37,89	0,19	0,49	0,28	8,8

FONTE – AUTOR.

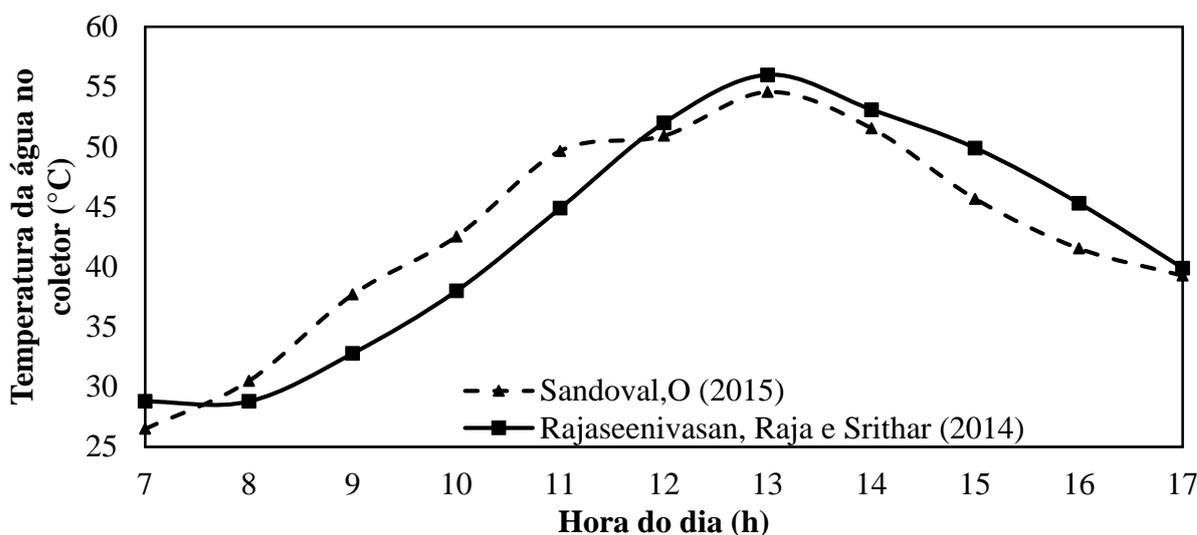


GRÁFICO 4.9 – Comparação da variação horária da temperatura da água dentro do coletor simulador.

FONTE – AUTOR.

As pequenas diferenças podem-se atribuir à diferença entre a latitude de Belo Horizonte e a cidade de Tamil Nadu, na Índia. Também, os autores desse trabalho fizeram o

estudo do coletor solar na horizontal diferente deste estudo onde foi utilizada uma inclinação de 36°.

#### 4.3.7 Temperatura da água no aproveitamento da energia solar.

O QUADRO 4.2 agrupa os valores simulados de temperatura da água que sai da torneira. Diferentes valores de temperaturas são encontrados devido as mudanças sazonais. Correções das temperaturas da TAB 3.2 foram feitas para conseguir ter um valor final.

QUADRO 4.2

Temperatura inicial da água no reservatório para a simulação dos meses.

MÊS	$\bar{T}_a$ [°C]	MÊS	$\bar{T}_a$ [°C]	MÊS	$\bar{T}_a$ [°C]
Janeiro	26,51	Maio	23,66	Setembro	24,06
Fevereiro	26,01	Junho	21,46	Outubro	26,16
Março	26,36	Julho	22,26	Novembro	26,26
Abril	25,51	Agosto	23,61	Dezembro	25,21

FONTE – AUTOR.

A temperatura máxima atingida pela água foi avaliada em um teste realizado até as 17h do dia avaliado. No algoritmo computacional era avaliado continuamente se a temperatura do fluido já tinha atingido pelo menos 45°C. Caso negativo, o mecanismo auxiliar do protótipo era ligado com o objetivo de atingir a temperatura ideal para banho.

O GRA. 4.10 ilustra as temperaturas máximas no transcorrer do dia de avaliação para os doze meses simulados. No gráfico observou-se que o mês de janeiro foi o único mês onde a totalidade dos 200 l da água atingiram os 45°C. Este foi o único caso onde não foi necessário ligar a BDC.

Por outro lado, os meses de fevereiro até dezembro foi determinante a ativação do mecanismo de apoio para conseguir atingir os 45°C.

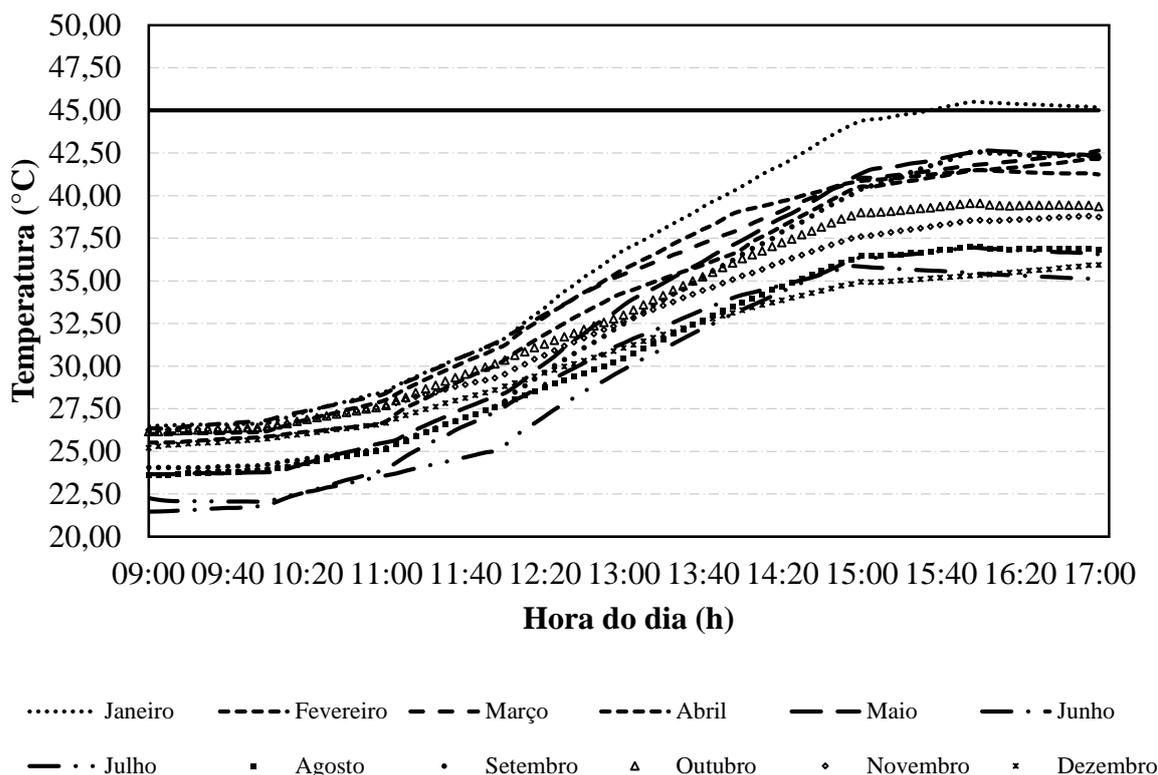


GRÁFICO 4.10 – Temperatura no reservatório (200 l) no transcorrer da simulação.

FONTE – AUTOR.

Pôde-se observar que a maior mudança de temperatura sempre ocorreu entre as 11h e as 15h, já que nesse período sempre tinha-se a maior disposição de energia no coletor solar. Por outro lado, conseguiu-se determinar que nos meses de fevereiro, março, abril, maio e setembro a temperatura da água manteve-se superior aos 40°C, uma temperatura que poderia ser considerada como agradável para banho. Como neste trabalho considerou-se que a temperatura mínima era 45°C, o mecanismo de apoio foi acionado para esses meses.

As temperaturas mais baixas foram encontradas nos meses de junho, julho, agosto e dezembro, com temperaturas que não superaram os 37°C. A temperatura mínima foi no mês de junho com 35°C e o trabalho da BDC não seria maior do que o necessário para aumentar a temperatura da água em 10°C.

#### 4.3.8 Funcionamento do sistema auxiliar – BDC.

O consumo médio em kWh da BDC para os meses do ano na cidade de Belo Horizonte é ilustrado no GRA. 4.11. O mecanismo atingiu o objetivo principal de elevar a temperatura da água armazenada até 45°C. A TAB. 4.7 ilustra o possível consumo médio mensal do funcionamento do protótipo na cidade de Belo Horizonte.

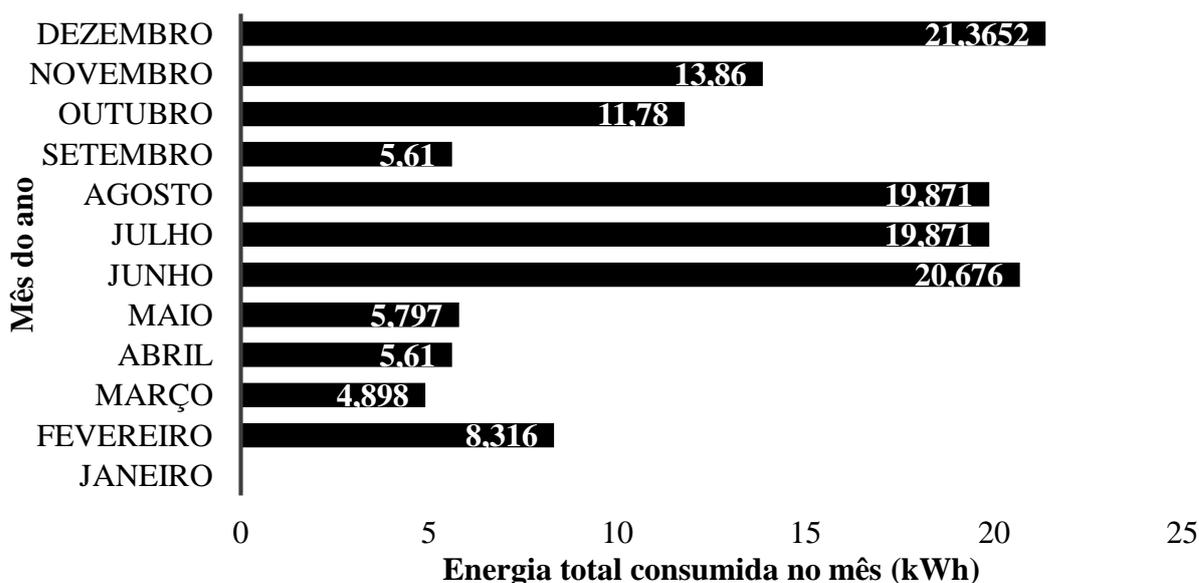


GRÁFICO 4.11 - Consumo médio em kWh da BDC para os meses do ano na cidade de Belo Horizonte.

FONTE – AUTOR.

TABELA 4.8

Custos mensais médios da energia utilizada pela BDC funcionando como mecanismo de apoio.

MÊS	VALOR		
	BDC (Sistema auxiliar)	Resistência Elétrica (Sistema auxiliar)	Resistência Elétrica (Sistema principal)
Janeiro	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 62,02
Fevereiro	R\$ 3,67	R\$ 10,75	R\$ 57,53
Março	R\$ 2,16	R\$ 7,91	R\$ 62,52
Abril	R\$ 2,47	R\$ 9,28	R\$ 63,26
Mai	R\$ 2,56	R\$ 8,82	R\$ 71,58
Junho	R\$ 9,13	R\$ 32,16	R\$ 76,41
Julho	R\$ 8,77	R\$ 28,34	R\$ 76,27
Agosto	R\$ 8,77	R\$ 27,44	R\$ 71,74
Setembro	R\$ 2,47	R\$ 8,93	R\$ 67,97
Outubro	R\$ 5,20	R\$ 18,88	R\$ 63,20
Novembro	R\$ 6,12	R\$ 20,29	R\$ 60,83
Dezembro	R\$ 9,43	R\$ 31,46	R\$ 66,38
<b>Anual (SI)</b>	<b>R\$ 60,61</b>	<b>R\$ 204,26</b>	<b>R\$ 799,71</b>
R\$ 0,441564	<b>Tarifa residencial Cemig (Sem Impostos - SI)</b>		

FONTE – AUTOR.

A partir dos valores agrupados na TAB. 4.8 conseguiu-se avaliar no GRA. 33 o tempo de retorno do protótipo auxiliar.

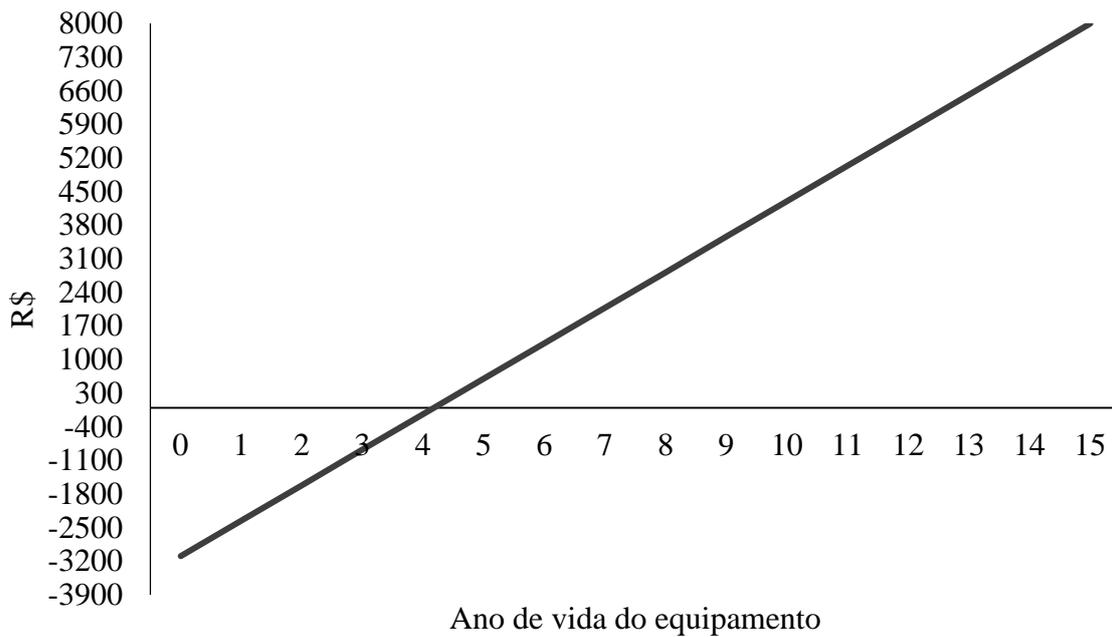


GRÁFICO 4.12 – Gráfico do fluxo de caixa projetado para 15 anos – Belo Horizonte.

FONTE – AUTOR.

A viabilidade financeira e o cálculo do fluxo de caixa apresentam valores positivos para a TIR, superior a 20%, bem como um retorno sobre o investimento inferior a 4,2 anos, período de tempo considerado adequado para o retornar do investimento.

Uma das questões principais do trabalho também foi determinar o coeficiente global de desempenho da bomba de calor (COP). A TAB. 4.8 agrupa os valores dos coeficientes determinados em cada um dos onze ensaios feitos para o aquecimento da água.

TABELA 4.9  
COP global da BDC

Mês	COP
Fevereiro	1,58
Março	2,06
Abril	1,82
Mai	1,86
Junho	2,21
Julho	1,87
Agosto	2,05
Setembro	1,88
Outubro	2,54
Novembro	1,40
Dezembro	2,04
Médio	1,88

FONTE – AUTOR.

Por último, foi observado como na pesquisa de Reis (2012), a degradação do coeficiente de performance da máquina cada vez que a temperatura da água aumentava. O GRA. 4.11 mostrou este comportamento para o mês de junho, sendo que foi um comportamento repetitivo nos outros meses.

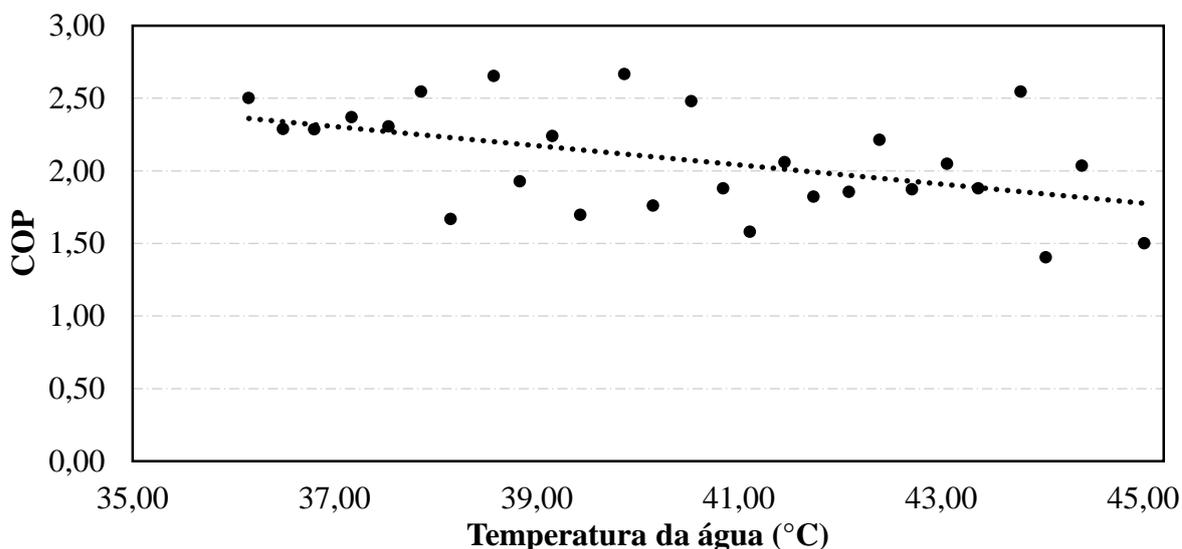


GRÁFICO 4.13 – Degradação do COP no mês de junho segundo aumenta a temperatura no reservatório  
FONTE – AUTOR.

A degradação do COP acontece em função do aquecimento da água no reservatório. Com isso a diferença entre as pressões de alta e baixa aumenta, o que influencia diretamente na redução do rendimento volumétrico do compressor, e por consequência, exigindo mais trabalho de compressão, reduzindo a eficiência do sistema.

#### 4.3.9 Considerações finais.

De acordo com os dados apresentados nos GRA. 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, pôde-se perceber que a cidade de Belo Horizonte tem anualmente a quantidade média de energia solar suficiente para incentivar o uso de equipamentos que aproveitem este tipo de energia para aquecimento de água.

Destaca-se que a inclinação dos painéis coletores podem aumentar significativamente a taxa de aproveitamento do recurso solar. Como pôde-se observar no GRA. 4.7, houve meses em que a radiação global média diária inclinada proporcionou valores superiores à horizontal.

Segundo dados do QUADRO 4.1, foi possível mediante o uso de comparação do coeficiente de claridade atmosférica, fazer a validação do correto funcionamento da modelagem matemática dos recursos solares.

Para a cidade de Belo Horizonte a energia solar que atinge esta localidade permitiu nos meses do ano elevar a temperatura da água para consumo doméstico até temperaturas médias de 40°C.

Por fim, o custo médio da energia auxiliar do conjunto coletor e BDC foi R\$ 54,57, conseguindo-se um COP médio de 1,88.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho apresentou uma extensa revisão da literatura sobre conceitos gerais de energia, dados sobre consumo de energia pelo aquecimento de água com uso de chuveiro elétrico, sistemas de aquecimento de água para uso residencial com o auxílio de sistemas de coletor solar e BDC e tipos de modelagem e simulação de recursos solares. Também, foi construído um protótipo simulador de coletor solar com base na transformação da energia solar absorvida por um dispositivo real padrão em energia elétrica transmitida através de resistências elétricas. Foram levantados pontos experimentais para os comportamentos horários médios mensais da energia solar que atinge a cidade de Belo Horizonte no sudeste do Brasil mediante o uso de algoritmos computacionais, ferramentas de controle e modelagem matemática. Com a análise dos resultados obtidos, foram avaliados os comportamentos térmicos do sistema simulador e do sistema auxiliar.

A seguir, são apresentadas as principais conclusões deste estudo, bem como recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões.

As seguintes conclusões podem ser extraídas deste estudo:

- A partir da revisão da literatura, observa-se que na maioria dos equipamentos solares para aquecimento de água residencial utilizam-se sistemas auxiliares que apresentam um consumo de energia superior ao apresentado neste trabalho. Entre eles, resistências elétricas e sistemas de aquecimento por queima de gás.
- A partir da análise dos resultados é possível concluir que as perdas da energia solar são devidas principalmente à inclinação do coletor e à baixa temperatura ambiente registradas na localidade em alguns meses. Segundo este trabalho, o bom uso da inclinação permite coletar uma maior quantidade de energia nos meses onde ela é mais necessitada, como é demonstrado nos meses de inverno.
- Os resultados experimentais demonstraram que mediante a simulação dos dados históricos solares na cidade de Belo Horizonte, janeiro destaca-se dos outros meses do ano porque nesse mês não é necessário utilizar um mecanismo de apoio, já que com o aproveitamento da energia alternativa consegue-se atender uma temperatura superior a 45°C.

- A temperatura atingida pela água nos meses de fevereiro, março, abril, maio e setembro poderia ser considerada como uma temperatura de conforto humano, já que nesses meses a temperatura manteve um valor entre 40°C e 43°C.
- O uso de estratégias simples de controle (on/off) permite que os dispositivos solares em conjunto com sistemas de apoio mantenham as condições térmicas de conforto para as quais foram projetados.
- A bomba de calor atuando em condições similares as condições reais obteve um coeficiente de performance (COP) de 1,88, um consumo médio anual de 137,65 kWh e um custo médio de R\$ 54,57.
- Por último, os resultados deste trabalho demonstraram que é possível desenvolver simuladores solares confiáveis onde possam-se estudar os comportamentos e as características de novos sistemas de apoio. Adicionalmente, ressalta-se o uso de modelos matemáticos e bases de dados históricas de radiação solar como ferramenta apropriada na caracterização de um protótipo auxiliar.

## **5.2 Recomendações para trabalhos futuros:**

- Avaliar o equipamento de apoio utilizando outro tipo de compressor, como por exemplo Scroll, tendo em vista que estes compressores possuem melhor rendimento o que possibilitaria um ganho no coeficiente de performance do equipamento.
- Desenvolver um novo modelo que utilize outros fluidos refrigerantes e outros sistemas de aproveitamento de energias limpas, como sistemas fotovoltaicos que permitam o acionamento do compressor com energia captada durante o dia.
- Estudar o funcionamento da bomba de calor como dispositivo de apoio usando expansão direta no evaporador pelo uso da energia solar, onde segundo a literatura, se obteria um ganho considerável no coeficiente de troca de calor.

## REFERÊNCIAS

- ACCOUNTS, N. R. Energy accounts for South Africa. In: AFRICA, S. S., 2005, Natural Resource Accounts.
- ADEME. Energy efficiency trends and policies in the household & tertiary sectors in the EU 27. Agence de l'Environnement et la Maitrise de l'Energie, 2009 the ODYSSEE/MURE project.
- AGUILAR, C.; WHITE, D.; RYAN, D. L. Domestic water heating and water heater energy consumption in Canada. **Canadian Building Energy End-Use Data and Analysis Centre**, 2005.
- AL-RASHED, A. A. A. Effect of evaporator temperature on vapor compression refrigeration system. **Alexandria Engineering Journal**, v. 50, n. 4, p. 283-290, 12// 2011. ISSN 1110-0168.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. Fundamentos de metrologia científica e industrial. **Editora Barueri**, 2008.
- APOLLO11. Latitude, longitude e altitude das cidades brasileiras., 2014. Disponível em: < [www.apollo11.com](http://www.apollo11.com) >. Acesso em: 30 de dezembro.
- BANK, T. W. Indicadores de desenvolvimento mundial país O Brasil. <http://www.worldbank.org/>, 2013. Acesso em: 09/04/2014.
- BRACKMANN, R. et al. ESTIMATIVAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DA RADIAÇÃO PAR A PARTIR DE DADOS DE ILUMINÂNCIA OBTIDOS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008.
- CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Governo de Minas & ANEEL. 2011
- CENSOLAR. **Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal**. Sevilla: 1993.
- CHATURVEDI, S. K.; GAGRANI, V. D.; ABDEL-SALAM, T. M. Solar- assisted heat pump – A sustainable system for low- temperature water heating applications. **Energy Conversion and Management**, v. 77, p. 550-557, 2014. ISSN 0196-8904.
- COMAKLI, O.; BAYRAMOGLU, M.; KAYGUSUZ, K. A thermodynamic model of a solar assisted heat pump system with energy storage. **Sol. Energy**, v. 56, n. 6, p. 485-492, 1996. ISSN 0038-092X.
- COOPER, P. I. The absorption of radiation in solar stills. **Solar Energy**, v. 12, n. 3, p. 333-346, 1969. ISSN 0038092X.
- CRESESB. **Atlas solarimétrico do Brasil. Banco de dados terrestres**. Recife. 2000
- DANG, C. B. et al. Effect of lubricating oil on cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide. **Int. J. Refrig.-Rev. Int. Froid**, v. 30, n. 4, p. 724-731, 2007. ISSN 0140-7007.

DAVIES, J. A.; HAY, J. E. Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface. Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop. Ministry of Supply and Services, Canada, 1980. p.32.

DE MELO REIS, R. V. et al. Using a heat pump as an alternative to support solar collector of wather heating in Brazil. **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration**, v. 20, n. 03, p. 1250013, 2012.

DE SOUZA ECHER, M. P.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. **A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados.** The significance of the cloud cover data and its variability - Methodology to data acquisition. 28: 341-352 p. 2006.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes.** John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1118418123.

ELETROBRAS; PROCEL. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobras Procel e Parceiros.** Eletrobras. Rio de Janeiro, p.240. 2012

ELETROBRAS; PROCEL. **Relatório de resultados do Procel 2013 - ano base 2012.** Rio de Janeiro 2013.

EPE. **Avaliação da Eficiência Energética para os próximos 10 anos (2012-2021).** Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia 2012.

EPE. **Balço Energético Nacional 2014: Ano base 2013.** Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2014

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v. 28, n. 4, p. 293-302, 1982. ISSN 0038092X.

FERNÁNDEZ-SEARA, J. et al. Experimental analysis of a direct expansion solar assisted heat pump with integral storage tank for domestic water heating under zero solar radiation conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 59, p. 1-8, 2012. ISSN 01968904.

GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. F. **Principles of solar engineering.** CRC Press, 2000. ISBN 1560327146.

GOVERNMENT, A. **State of Australian Cities 2013.** TRANSPORT, D. O. I. A.: Major Cities Unit, Infrastructure Australia 2013.

GUEDES, M. et al. **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA A PARTIR DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.** Sistema de organização nacional de dados ambientais. Rede Sonda 2006.

HAWLADER, M. N. A.; CHOU, S. K.; ULLAH, M. Z. The performance of a solar assisted heat pump water heating system. **Appl. Therm. Eng.**, v. 21, n. 10, p. 1049-1065, 2001. ISSN 1359-4311.

HOTTEL, H. C. Simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. **Solar Energy**, v. 18, n. 2, 1976.

IBRAHIM, O. et al. Optimal management proposal for hybrid water heating system. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 342-357, 2014a. ISSN 03787788.

IBRAHIM, O. et al. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. **Building and Environment**, v. 72, p. 259, 2014b. ISSN 0360-1323.

IEA. **Key World Energy Statistics 2014 - International Energy Agency**. Paris, p.81. 2014

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231-295, 2004. ISSN 0360-1285.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 23, n. 2, p. 111-114, 1979. ISSN 0038-092X.

*LABSOL, L. D. E. S.-. RADIASOL2. SUL, E. D. E. D. U. F. D. R. G. D. Porto Alegre - RS - Brasil: LABSOL: <http://www.solar.ufrgs.br/> p. 2014.*

LEVINE, M. et al. Residential and commercial buildings. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, C., UNITED KINGDOM AND NEW YORK, NY, USA. (Ed.). **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Chang**, 2007.

LI, Y. W. et al. Experimental performance analysis on a direct- expansion solar- assisted heat pump water heater. **Appl. Therm. Eng.**, v. 27, n. 17-18, p. 2858-2868, 2007. ISSN 1359-4311.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, p. 1-19, 1960. ISSN 0038092X.

MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. **Energy Policy**, v. 48, p. 640-649, 2012. ISSN 03014215.

MARTINS, F. R. et al. Mapas de irradiação solar para o Brasil–Resultados do Projeto SWERA. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil**, p. 16-21, 2005.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. D. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário–o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.

MAUTHNER, F.; WEISS, W. **Solar Heat Worldwide: Solar Heating & Cooling Programme** International Energy Agency 2013.

MMA; MEC; IDEC. **CONSUMO SUSTENTÁVEL: Manual de educação. Consumers International**. Brasília: 160 p. 2005.

OWEN, N. A.; INDERWILDI, O. R.; KING, D. A. **The status of conventional world oil reserves- Hype or cause for concern?** 38: 4743-4749 p. 2010.

PANARAS, G.; MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V. A method for the dynamic testing and evaluation of the performance of combined solar thermal heat pump hot water systems. **Applied Energy**, v. 114, p. 124-134, 2014. ISSN 03062619.

PEREIRA, E. B.; LIMA, J. H. G. **Solar and Wind Energy Resource Assessment in BRAZIL**. São José dos Campos: National Institute for Space Research - INPE, 2008. 104.

PETTIT, R. B.; SOWELL, R. R. SOLAR ABSORPTANCE AND EMITTANCE PROPERTIES OF SEVERAL SOLAR COATINGS. **J Vac Sci Technol**, v. 13, n. 2, p. 596-602, 1976.

PROCEL; ELETROBRÁS. **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil - Ano base 2005 - Classe residencial - Relatório Brasil**. ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S. A., PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 2007

RAHMAN, S. M. A.; SAIDUR, R.; HAWLADER, M. N. A. An economic optimization of evaporator and air collector area in a solar assisted heat pump drying system. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 377-384, 2013. ISSN 01968904.

RAJASEENIVASAN, T.; RAJA, P.; SRITHAR, K. An experimental investigation on a solar still with an integrated flat plate collector. **Desalination**, v. 347, p. 131-137, 2014. ISSN 0011-9164.

REINDL, D. T.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. **Solar Energy**, v. 45, n. 1, p. 9-17, 1990. ISSN 0038092X.

REIS, R. V. D. M. **ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA ENTRE UMA BOMBA DE CALOR E UMA RESISTÊNCIA ELÉTRICA COMO DISPOSITIVO DE APOIO DE ENERGIA PARA UM AQUECEDOR SOLAR DE ÁGUA**. 2012. 109 (Tese de Doutorado). Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. Brasil.

REN21. **Renewables 2014 Global Status Report**. Paris. REN21 Secretariat. 2014

RODRIGUES, D.; MATAJS, R. Banho de sol para o Brasil: o que os aquecedores solares podem fazer pelo meio ambiente e a sociedade. In: (Ed.): Vitae Civilis, 2004.

RODRÍGUEZ-HIDALGO, M. C. et al. Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p. 2394-2404, 2011. ISSN 13594311.

ROSAS-FLORES, J. A.; ROSAS-FLORES, D.; GÁLVEZ, D. M. Saturation, energy consumption, CO<sub>2</sub> emission and energy efficiency from urban and rural

households appliances in Mexico. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 1, p. 10-18, 2011. ISSN 0378-7788.

SANTOS, M. J. D. et al. **AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR EM RESIDÊNCIAS DE BAIXA RENDA. XXI SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA** Florianópolis - SC 2011.

SCARPA, F.; TAGLIAFICO, L. A.; TAGLIAFICO, G. Integrated solar- assisted heat pumps for water heating coupled to gas burners; control criteria for dynamic operation. **Appl. Therm. Eng.**, v. 31, n. 1, p. 59-68, 2011. ISSN 1359-4311.

SIEGEL, R.; HOWELL., J. R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 4nd. New York: CRC press, 2002. ISBN 1560328398.

TABOR, H., BULL. Radiation, convection and conduction coefficients in solar collectors. **Solar Energy**, v. 3, n. Res. Council Israel 6C (3): 155–176., p. 64-64, 1959. ISSN 0038-092X.

TAYLOR, B. N. **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results (rev.** DIANE Publishing, 2009. ISBN 1437915566.

ZHANG, X. et al. Socio-economic performance of a novel solar photovoltaic/loop- heat-pipe heat pump water heating system in three different climatic regions. **Applied Energy**, v. 135, p. 20-34, 2014. ISSN 0306-2619.

ZHOU, N. et al. Energy use in China: sectoral trends and future outlook. **Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2008.

## ANEXO A

Neste anexo são apresentadas as medições adquiridas em cada um dos testes.

TABELA A.1

Resultados experimentais da simulação – Mês de fevereiro. \*BDC em funcionamento.

<b>HORA</b> <b>[hh:mm]</b>	<b>T Amb</b> <b>[°C]</b>	<b>T Água</b> <b>[°C]</b>	<b>TC1</b> <b>[°C]</b>	<b>TC2</b> <b>[°C]</b>	<b>TC3</b> <b>[°C]</b>	<b>TC4</b> <b>[°C]</b>	<b>TC5</b> <b>[°C]</b>	<b>S</b> <b>[MJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Kt</b>	<b>I</b> <b>[MJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>POT_E</b> <b>[W]</b>
08:00	22,65	26,00	25,20	26,05	26,50	27,30	29,75	0,92	0,45	1,43	16,29
08:30	22,65	26,01	25,23	26,09	26,54	27,43	29,80	0,92	0,45	1,43	16,29
09:00	22,65	26,01	25,27	26,11	26,57	27,69	29,82	1,40	0,39	2,10	24,79
09:30	22,65	26,06	25,15	26,26	27,18	28,44	28,10	1,40	0,39	2,10	24,79
10:00	22,65	26,18	25,11	28,56	30,90	33,99	31,01	1,68	0,37	2,46	59,57
10:30	22,65	27,15	25,28	28,35	30,98	35,25	35,28	1,68	0,37	2,46	59,57
11:00	22,65	28,02	25,39	29,59	33,31	39,27	38,38	1,97	0,48	2,84	81,88
11:30	22,65	29,74	25,49	29,66	33,58	40,18	40,50	1,97	0,48	2,84	81,88
12:00	22,65	31,23	25,74	30,90	35,81	44,04	43,75	1,88	0,58	2,73	105,95
12:30	22,65	33,59	26,51	31,66	36,69	45,29	45,89	1,88	0,58	2,73	105,95
13:00	22,65	35,68	27,84	32,80	37,61	45,86	46,53	1,78	0,61	2,60	100,78
13:30	22,65	37,45	29,40	34,30	38,98	46,98	47,48	1,78	0,61	2,60	100,78
14:00	22,65	39,12	31,24	35,32	39,12	45,67	46,66	1,32	0,60	1,98	81,05
14:30	22,65	39,99	32,72	36,82	40,54	46,71	46,91	1,32	0,60	1,98	81,05
15:00	22,65	40,86	34,09	37,30	40,18	44,94	45,66	0,86	0,61	1,32	66,50
15:30	22,65	41,17	35,00	38,27	41,08	45,49	45,35	0,86	0,61	1,32	66,50
16:00	22,65	41,50	35,86	38,00	39,83	42,79	43,87	0,54	0,55	0,87	45,08
16:30	22,65	41,34	36,03	38,28	40,03	42,46	41,83	0,54	0,55	0,87	45,08
17:00*	22,65	41,45	36,42	36,75	37,44	39,22	41,13	0,18	0,50	0,28	4,64
17:30*	22,65	42,09	36,42	36,75	37,44	39,22	41,13	0,00	0,00	0,00	0,00
18:00*	22,65	42,71	36,42	36,75	37,44	39,22	41,13	0,00	0,00	0,00	0,00
18:30*	22,65	43,79	36,42	36,75	37,44	39,22	41,13	0,00	0,00	0,00	0,00
18:45*	22,65	45,01	36,42	36,75	37,44	39,22	41,13	0,00	0,00	0,00	0,00

TABELA A.2

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de fevereiro.

<b>HORA</b> <b>[hh:mm]</b>	<b>W</b> <b>[Wh]</b>	<b>M1</b> <b>[psi]</b>	<b>M2</b> <b>[psi]</b>	<b>M3</b> <b>[bar]</b>	<b>M4</b> <b>[bar]</b>	<b>M1</b> <b>[kPa]</b>	<b>M2</b> <b>[kPa]</b>	<b>M3</b> <b>[kPa]</b>	<b>M4</b> <b>[kPa]</b>
17:00*	141332	188,00	188,00	2,70	1,90	1386,81	1386,81	360,60	280,60
17:30*	141407	195,00	193,00	2,70	1,90	1435,08	1421,29	360,60	280,60
18:00*	141482	195,00	195,00	2,60	1,90	1435,08	1435,08	350,60	280,60
18:30*	141557	200,00	200,00	2,70	2,00	1469,55	1469,55	360,60	290,60
18:45*	141629	200,00	200,00	3,00	2,20	1469,55	1469,55	390,60	310,60

TABELA A.3

Resultados experimentais da simulação – Mês de março. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	23,00	26,14	20,80	24,30	24,27	24,74	24,80	0,98	0,43	1,42	14,4
08:30	23,00	26,29	20,84	24,36	24,31	24,78	25,10	0,98	0,43	1,42	14,4
09:00	23,00	26,36	20,90	24,40	24,37	24,84	25,57	1,50	0,52	2,08	36,9
09:30	23,00	26,54	25,73	27,59	29,02	31,14	30,86	1,50	0,52	2,08	36,9
10:00	23,00	26,82	25,77	28,80	31,13	34,44	32,82	2,05	0,56	2,71	56,3
10:30	23,00	27,63	25,85	28,77	31,28	35,21	35,19	2,05	0,56	2,71	56,3
11:00	23,00	28,41	26,00	30,24	33,91	39,72	38,59	2,20	0,59	2,90	82,9
11:30	23,00	30,08	26,05	30,17	34,04	40,50	40,82	2,20	0,59	2,90	82,9
12:00	23,00	31,65	26,18	31,19	35,83	43,55	43,44	2,27	0,56	2,97	99,2
12:30	23,00	33,63	26,90	31,84	36,63	44,63	45,16	2,27	0,56	2,97	99,2
13:00	23,00	35,38	28,03	32,54	36,88	44,20	44,93	1,92	0,58	2,58	90,7
13:30	23,00	36,71	29,42	34,02	38,31	45,33	45,48	1,92	0,58	2,58	90,7
14:00	23,00	38,08	30,92	35,63	40,14	47,55	47,75	1,47	0,56	2,04	94,6
14:30	23,00	39,63	32,46	37,15	41,64	49,00	49,34	1,47	0,56	2,04	94,6
15:00	23,00	41,03	33,77	37,40	40,69	46,17	47,32	1,04	0,59	1,51	69,3
15:30	23,00	41,37	34,61	38,19	41,31	46,17	46,13	1,04	0,59	1,51	69,3
16:00	23,00	41,82	35,59	38,86	41,69	46,15	46,28	0,54	0,48	0,86	64,8
16:30	23,00	42,18	36,48	39,78	42,57	46,91	46,72	0,54	0,48	0,86	64,8
17:00*	23,00	42,64	37,25	40,88	43,76	47,87	44,43	0,15	0,43	0,25	14,4
17:30*	23,00	43,41	37,25	40,88	43,76	47,87	44,43	0,00	0,00	0,00	0,00
18:00*	23,00	44,16	37,25	40,88	43,76	47,87	44,43	0,00	0,00	0,00	0,00
18:30*	23,00	44,80	37,25	40,88	43,76	47,87	44,43	0,00	0,00	0,00	0,00
18:40*	23,00	45,30	37,25	40,88	43,76	47,87	44,43	0,00	0,00	0,00	0,00

TABELA A.4

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de março.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	141649	195,00	196,00	2,50	1,80	1435,08	1441,97	340,60	270,60
17:30*	141700	196,00	196,00	2,50	1,80	1441,97	1441,97	340,60	270,60
18:00*	141751	199,00	198,00	2,50	1,80	1462,66	1455,76	340,60	270,60
18:30*	141802	200,00	200,00	2,40	1,80	1469,55	1469,55	330,60	270,60
18:40*	141807	202,00	201,00	2,50	1,80	1483,34	1476,45	340,60	270,60

TABELA A.5

Resultados experimentais da simulação – Mês de abril. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	22,15	25,44	20,13	24,23	24,18	24,27	25,88	0,91	0,49	1,60	28,2
08:30	22,15	25,59	24,93	26,25	27,34	28,83	28,34	0,91	0,49	1,60	28,2
09:00	22,15	25,80	24,92	27,25	28,91	30,93	29,32	1,56	0,49	2,16	42,2
09:30	22,15	26,19	25,12	27,21	29,02	31,68	31,49	1,56	0,49	2,16	42,2
10:00	22,15	26,69	25,22	29,78	33,49	39,09	36,92	2,06	0,58	2,76	85,3
10:30	22,15	28,65	25,35	29,65	33,68	40,43	40,76	2,06	0,58	2,76	85,3
11:00	22,15	30,30	25,42	30,29	34,95	42,78	42,69	1,99	0,63	2,89	101,8
11:30	22,15	32,43	25,78	30,76	35,64	43,95	44,59	1,99	0,63	2,89	101,8
12:00	22,15	34,23	26,78	31,29	35,66	43,11	44,00	2,24	0,58	3,24	89,2
12:30	22,15	35,47	28,10	32,52	36,70	43,70	44,07	2,24	0,58	3,24	89,2
13:00	22,15	36,80	29,62	34,70	39,54	47,58	47,46	1,93	0,63	2,69	109,9
13:30	22,15	38,74	31,42	36,44	41,29	49,41	49,91	1,93	0,63	2,69	109,9
14:00	22,15	40,46	32,91	36,65	40,13	46,08	47,43	1,67	0,60	2,19	75,7
14:30	22,15	40,87	33,84	37,53	40,78	45,98	45,98	1,67	0,60	2,19	75,7
15:00	22,15	41,43	34,94	38,16	40,98	45,51	45,85	0,92	0,61	1,58	66,2
15:30	22,15	41,74	35,90	39,14	41,90	46,19	45,95	0,92	0,61	1,58	66,2
16:00	22,15	42,07	36,70	40,06	42,91	47,27	46,96	0,48	0,49	0,84	9,0
16:30	22,15	42,14	36,70	40,06	42,91	47,27	46,96	0,48	0,49	0,84	9,0
17:00*	22,15	42,14	36,70	40,06	42,91	47,27	46,96	0,10	0,46	0,19	0,0
17:30*	22,15	43,06	36,70	40,06	42,91	47,27	46,96	0,00	0,00	0,00	0,00
18:00*	22,15	43,79	36,70	40,06	42,91	47,27	46,96	0,00	0,00	0,00	0,00
18:30*	22,15	44,39	36,70	40,06	42,91	47,27	46,96	0,00	0,00	0,00	0,00
18:55*	22,15	45,21	36,70	40,06	42,91	47,27	46,96	0,00	0,00	0,00	0,00

TABELA A.6

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de abril.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	141842	175,00	175,00	2,60	1,80	1297,18	1297,18	350,60	270,60
17:30*	141888	175,00	175,00	2,60	1,90	1297,18	1297,18	350,60	280,60
18:00*	141934	179,00	179,00	2,50	1,80	1324,76	1324,76	340,60	270,60
18:30*	141980	180,00	180,00	2,50	1,80	1331,66	1331,66	340,60	270,60
18:55*	142029	181,00	181,00	2,50	1,80	1338,55	1338,55	340,60	270,60

TABELA A.7

Resultados experimentais da simulação – Mês de maio. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	20,30	23,56	22,18	23,74	24,90	25,18	25,85	0,96	0,48	1,39	27,6
08:30	20,30	23,60	22,24	23,80	24,92	25,29	25,86	0,96	0,48	1,39	27,6
09:00	20,30	23,66	22,28	23,86	24,99	25,52	25,90	1,44	0,54	2,13	61,0
09:30	20,30	23,73	22,27	23,65	24,79	26,40	26,28	1,44	0,54	2,13	61,0
10:00	20,30	23,78	22,29	23,66	24,80	26,41	26,32	2,01	0,57	2,80	79,4
10:30	20,30	24,64	22,46	25,74	28,63	33,31	33,46	2,01	0,57	2,80	79,4
11:00	20,30	25,53	22,60	25,90	28,81	33,54	33,68	2,13	0,64	3,00	111,2
11:30	20,30	27,03	22,87	27,13	31,15	38,02	38,28	2,13	0,64	3,00	111,2
12:00	20,30	28,42	23,21	27,43	31,43	38,32	38,53	2,22	0,63	2,94	102,7
12:30	20,30	31,07	24,00	29,51	35,07	44,79	45,39	2,22	0,63	2,94	102,7
13:00	20,30	33,57	25,38	30,88	36,51	45,99	46,63	1,92	0,65	2,71	106,2
13:30	20,30	35,51	27,04	32,18	37,26	46,03	46,55	1,92	0,65	2,71	106,2
14:00	20,30	37,39	29,04	34,13	39,23	47,82	48,28	1,37	0,62	2,15	75,6
14:30	20,30	39,29	31,13	36,20	41,16	49,67	50,10	1,37	0,62	2,15	75,6
15:00	20,30	41,29	33,22	38,32	43,33	51,65	52,11	0,97	0,55	1,52	43,0
15:30	20,30	41,95	34,50	38,21	41,59	46,97	46,97	0,97	0,55	1,52	43,0
16:00	20,30	42,64	35,89	39,58	42,89	48,20	48,14	0,44	0,54	0,73	0,0
16:30	20,30	42,51	35,98	38,10	39,77	42,06	41,36	0,44	0,54	0,73	0,0
17:00*	20,30	42,37	36,48	38,61	40,27	42,53	41,81	0,00	0,00	0,00	0,0
17:30*	20,30	43,29	36,48	38,61	40,27	42,53	41,81	0,00	0,00	0,00	0,0
18:00*	20,30	43,80	36,48	38,61	40,27	42,53	41,81	0,00	0,00	0,00	0,0
18:30*	20,30	44,20	36,48	38,61	40,27	42,53	41,81	0,00	0,00	0,00	0,0
18:45*	20,30	45,50	36,48	38,61	40,27	42,53	41,81	0,00	0,00	0,00	0,0

TABELA A.8

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de maio.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	142039	175,00	175,00	2,60	1,80	1297,18	1297,18	350,60	270,60
17:30*	142085	175,00	175,00	2,60	1,90	1297,18	1297,18	350,60	280,60
18:00*	142131	179,00	179,00	2,50	1,80	1324,76	1324,76	340,60	270,60
18:30*	142177	200,00	200,00	2,40	1,80	1469,55	1469,55	330,60	270,60
18:45*	142226	202,00	201,00	2,50	1,80	1483,34	1476,45	340,60	270,60

TABELA A.9

Resultados experimentais da simulação – Mês de junho. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	18,10	21,38	16,14	19,12	24,01	25,08	19,69	0,86	0,48	1,39	29,7
08:30	18,10	21,40	16,17	19,30	24,00	25,10	19,69	0,86	0,48	1,39	29,7
09:00	18,10	21,46	16,20	20,05	24,35	25,33	19,69	1,55	0,52	2,13	64,8
09:30	18,10	21,62	20,73	22,24	23,36	25,91	24,51	1,55	0,52	2,13	64,8
10:00	18,10	21,85	20,90	24,50	27,06	30,57	27,92	2,02	0,61	2,80	91,1
10:30	18,10	22,95	21,12	24,46	27,38	32,13	32,20	2,02	0,61	2,80	91,1
11:00	18,10	23,97	21,22	25,73	29,68	36,12	35,25	2,30	0,65	3,00	102,8
11:30	18,10	25,90	21,32	25,83	30,12	37,39	37,76	2,30	0,65	3,00	102,8
12:00	18,10	27,62	21,63	26,64	31,44	39,52	39,67	2,19	0,67	2,94	95,1
12:30	18,10	29,59	22,53	27,53	32,38	40,65	41,20	2,19	0,67	2,94	95,1
13:00	18,10	31,34	23,91	28,60	33,11	40,79	41,44	2,06	0,65	2,71	82,2
13:30	18,10	32,81	25,42	30,13	34,59	42,10	42,49	2,06	0,65	2,71	82,2
14:00	18,10	34,18	26,98	31,15	35,04	41,64	42,32	1,57	0,66	2,15	40,2
14:30	18,10	35,05	28,31	32,39	36,10	42,20	42,33	1,57	0,66	2,15	40,2
15:00	18,10	35,84	29,49	31,57	33,45	36,81	39,10	1,00	0,62	1,52	13,3
15:30	18,10	35,63	29,41	31,46	33,02	35,17	34,46	1,00	0,62	1,52	13,3
16:00	18,10	35,42	29,78	30,38	31,20	32,98	34,06	0,44	0,56	0,73	0,0
16:30	18,10	35,25	25,08	26,46	26,33	26,32	24,72	0,44	0,56	0,73	0,0
17:00*	18,10	35,09	22,94	23,95	23,81	23,84	21,38	0,00	0,00	0,00	0,0
17:30*	18,10	40,15	22,94	23,95	23,81	23,84	21,38	0,00	0,00	0,00	0,0
18:00*	18,10	43,79	22,94	23,95	23,81	23,84	21,38	0,00	0,00	0,00	0,0
18:30*	18,10	45,01	22,94	23,95	23,81	23,84	21,38	0,00	0,00	0,00	0,0

TABELA A.10

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de junho.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	142197	354,00	175,00	175,00	2,80	1,60	1297,18	1297,18	370,60
17:30*	142446	276,00	193,00	193,00	2,60	1,90	1421,29	1421,29	350,60
18:00*	142655	336,00	200,00	200,00	2,70	2,00	1469,55	1469,55	360,60
18:30*	142886	360,00	200,00	200,00	2,80	2,00	1469,55	1469,55	370,60

TABELA A.11

Resultados experimentais da simulação – Mês de julho. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	18,90	22,20	16,55	17,26	17,23	17,76	18,24	1,04	0,48	1,50	10,5
08:30	18,90	22,24	16,60	17,27	17,30	17,81	18,26	1,04	0,48	1,50	10,5
09:00	18,90	22,26	16,65	17,29	17,50	17,85	18,30	1,54	0,57	2,08	15,9
09:30	18,90	22,07	16,64	19,43	19,44	19,49	17,73	1,54	0,57	2,08	15,9
10:00	18,90	22,08	17,81	23,65	25,86	27,88	20,93	2,16	0,61	2,86	17,7
10:30	18,90	22,88	21,39	24,54	27,20	31,21	31,20	2,16	0,61	2,86	17,7
11:00	18,90	23,59	21,45	25,04	28,13	32,73	32,27	2,42	0,67	3,03	21,0
11:30	18,90	24,38	21,48	25,03	28,17	33,00	33,11	2,42	0,67	3,03	21,0
12:00	18,90	25,36	21,58	27,14	32,09	39,98	38,78	2,44	0,69	3,08	20,2
12:30	18,90	27,79	21,94	27,36	32,57	41,29	41,99	2,44	0,69	3,08	20,2
13:00	18,90	29,80	22,71	28,05	33,17	41,72	42,42	2,08	0,70	2,78	20,6
13:30	18,90	31,61	23,80	29,09	34,14	42,56	43,23	2,08	0,70	2,78	20,6
14:00	18,90	33,32	25,39	30,58	35,51	43,68	44,33	1,61	0,66	2,22	17,4
14:30	18,90	34,88	27,15	32,27	37,11	45,11	45,60	1,61	0,66	2,22	17,4
15:00	18,90	36,36	28,78	32,32	35,59	41,00	42,54	0,98	0,62	1,54	13,2
15:30	18,90	36,61	29,72	33,29	36,43	41,22	41,14	0,98	0,62	1,54	13,2
16:00	18,90	36,92	30,66	32,91	34,90	38,03	39,29	0,47	0,55	0,75	10,0
16:30	18,90	36,74	30,91	33,25	35,13	37,64	36,97	0,47	0,55	0,75	10,0
17:00*	18,90	36,55	31,32	31,69	32,42	34,20	36,16	0,00	0,00	0,00	0,0
17:30*	18,90	40,28	31,32	31,69	32,42	34,20	36,16	0,00	0,00	0,00	0,0
18:00*	18,90	42,46	31,32	31,69	32,42	34,20	36,16	0,00	0,00	0,00	0,0
18:30*	18,90	44,17	31,32	31,69	32,42	34,20	36,16	0,00	0,00	0,00	0,0
18:40*	18,90	45,10	31,32	31,69	32,42	34,20	36,16	0,00	0,00	0,00	0,0

TABELA A.12

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de julho.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	142901	175,00	175,00	2,80	1,60	1297,18	1297,18	370,60	250,60
17:30*	143061	175,00	175,00	2,60	1,90	1297,18	1297,18	350,60	280,60
18:00*	143221	175,00	175,00	2,70	1,90	1297,18	1297,18	360,60	280,60
18:30*	143381	177,00	177,00	2,60	1,70	1310,97	1310,97	350,60	260,60
18:40*	143542	180,00	180,00	2,60	1,90	1331,66	1331,66	350,60	280,60

TABELA A.13

Resultados experimentais da simulação – Mês de agosto. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	20,25	23,00	21,20	23,90	23,93	23,78	24,01	1,01	0,53	1,58	47,2
08:30	20,25	23,20	21,40	24,10	23,99	23,84	24,24	1,01	0,53	1,58	47,2
09:00	20,25	23,61	21,54	24,29	24,03	23,89	24,26	1,57	0,54	2,34	77,1
09:30	20,25	23,74	23,08	24,66	25,82	27,31	26,97	1,57	0,54	2,34	77,1
10:00	20,25	23,92	23,20	26,30	28,51	31,23	28,68	2,17	0,60	2,83	110,3
10:30	20,25	24,53	23,33	26,19	28,64	32,40	32,34	2,17	0,60	2,83	110,3
11:00	20,25	25,15	23,37	27,62	31,27	36,80	35,35	2,45	0,66	3,15	115,2
11:30	20,25	26,57	23,41	27,52	31,35	37,60	37,70	2,45	0,66	3,15	115,2
12:00	20,25	27,81	23,45	27,94	32,18	39,01	38,81	2,55	0,68	3,18	115,0
12:30	20,25	29,17	23,75	28,26	32,55	39,52	39,72	2,55	0,68	3,18	115,0
13:00	20,25	30,44	24,36	29,52	34,43	42,40	42,11	2,32	0,70	2,87	94,7
13:30	20,25	32,16	25,57	30,57	35,50	43,66	43,91	2,32	0,70	2,87	94,7
14:00	20,25	33,76	26,86	31,67	36,38	43,99	44,51	1,73	0,69	2,28	53,3
14:30	20,25	35,17	28,11	32,93	37,58	45,01	45,40	1,73	0,69	2,28	53,3
15:00	20,25	36,45	29,40	32,87	36,15	41,45	42,88	1,06	0,63	1,52	20,3
15:30	20,25	36,69	30,25	33,69	36,76	41,36	41,25	1,06	0,63	1,52	20,3
16:00	20,25	37,00	31,17	33,66	35,90	39,28	40,08	0,53	0,56	0,84	0,0
16:30	20,25	36,88	31,58	34,09	36,19	39,09	38,62	0,53	0,56	0,84	0,0
17:00*	20,25	36,82	32,06	33,09	34,21	36,21	37,82	0,00	0,00	0,00	0,0
17:30*	20,25	40,30	32,06	33,09	34,21	36,21	37,82	0,00	0,00	0,00	0,0
18:00*	20,25	42,50	32,06	33,09	34,21	36,21	37,82	0,00	0,00	0,00	0,0
18:30*	20,25	44,24	32,06	33,09	34,21	36,21	37,82	0,00	0,00	0,00	0,0
18:40*	20,25	45,00	32,06	33,09	34,21	36,21	37,82	0,00	0,00	0,00	0,0

TABELA A.14

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de agosto.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	143557	175,00	175,00	2,60	1,80	1297,18	1297,18	350,60	270,60
17:30*	143717	175,00	175,00	2,60	1,90	1297,18	1297,18	350,60	280,60
18:00*	143877	179,00	179,00	2,50	1,80	1324,76	1324,76	340,60	270,60
18:30*	144037	177,00	177,00	2,60	1,70	1310,97	1310,97	350,60	260,60
18:40*	144198	180,00	180,00	2,60	1,90	1331,66	1331,66	350,60	280,60

TABELA A.15

Resultados experimentais da simulação – Mês de setembro. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	20,70	23,60	19,21	21,36	21,42	21,73	22,00	1,04	0,47	1,62	48,34
08:30	20,70	24,01	19,33	21,45	21,48	21,78	22,13	1,04	0,47	1,62	48,34
09:00	20,70	24,06	19,82	21,58	21,59	21,88	23,32	1,60	0,53	2,43	75,3
09:30	20,70	24,06	23,44	24,53	25,43	26,43	25,81	1,60	0,53	2,43	75,3
10:00	20,70	24,22	23,36	26,25	28,17	30,32	27,67	2,03	0,59	2,85	102
10:30	20,70	24,74	23,52	26,08	28,22	31,34	31,28	2,03	0,59	2,85	102
11:00	20,70	25,23	23,65	27,91	31,51	36,73	35,05	2,25	0,62	3,20	119,5
11:30	20,70	26,63	23,71	27,84	31,69	37,77	38,07	2,25	0,62	3,20	119,5
12:00	20,70	27,96	23,71	29,38	34,76	43,18	42,56	2,28	0,63	3,35	134,2
12:30	20,70	30,40	24,02	29,67	35,30	44,39	45,26	2,28	0,63	3,35	134,2
13:00	20,70	32,49	24,86	30,38	35,90	45,00	45,60	2,00	0,64	3,05	132,2
13:30	20,70	34,52	26,29	31,86	37,39	46,43	47,21	2,00	0,64	3,05	132,2
14:00	20,70	36,57	28,23	33,65	39,06	47,93	48,65	1,60	0,62	2,38	119,5
14:30	20,70	38,46	30,26	35,66	40,96	49,83	50,38	1,60	0,62	2,38	119,5
15:00	20,70	40,39	32,21	36,89	41,35	48,87	49,81	1,07	0,59	1,62	81,1
15:30	20,70	41,57	33,85	38,53	42,94	50,08	50,38	1,07	0,59	1,62	81,1
16:00	20,70	42,57	35,37	37,91	40,29	44,19	46,02	0,52	0,54	0,89	39,5
16:30	20,70	42,36	35,70	38,42	40,73	43,94	43,45	0,52	0,54	0,89	39,5
17:00*	20,70	42,25	36,21	37,01	37,95	39,90	42,28	0,13	0,46	0,14	5,91
17:35*	20,70	45,01	36,21	37,01	37,95	39,90	42,28	0,13	0,46	0,14	5,91

TABELA A.16

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de setembro.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	144208	200,00	200,00	2,40	1,80	1469,55	1469,55	330,60	270,60
17:35*	144395	202,00	201,00	2,50	1,80	1483,34	1476,45	340,60	270,60

TABELA A.17

Resultados experimentais da simulação – Mês de outubro. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
08:00	22,80	25,93	23,20	24,40	25,20	26,3	24,23	1,03	0,44	1,42	62,7
08:30	22,80	26,01	23,60	25,60	25,80	26,43	24,36	1,03	0,44	1,42	62,7
09:00	22,80	26,16	23,75	26,84	26,58	26,44	24,85	1,51	0,51	2,10	98,3
09:30	22,80	26,29	25,63	27,21	28,37	29,86	29,52	1,51	0,51	2,10	98,3
10:00	22,80	26,47	25,75	28,85	31,06	33,78	31,23	1,77	0,56	2,47	117,3
10:30	22,80	27,08	25,88	28,74	31,19	34,95	34,89	1,77	0,56	2,47	117,3
11:00	22,80	27,70	25,92	30,17	33,82	39,35	37,90	2,03	0,56	2,88	134,8
11:30	22,80	29,12	25,96	30,07	33,90	40,15	40,25	2,03	0,56	2,88	134,8
12:00	22,80	30,36	26,00	30,49	34,73	41,56	41,36	2,12	0,59	2,84	142,6
12:30	22,80	31,92	26,36	30,91	35,22	42,24	42,45	2,12	0,59	2,84	142,6
13:00	22,80	32,99	26,91	32,07	36,98	44,95	44,66	1,80	0,61	2,68	119,1
13:30	22,80	34,71	28,12	33,12	38,05	46,21	46,46	1,80	0,61	2,68	119,1
14:00	22,80	36,31	29,41	34,22	38,93	46,54	47,06	1,43	0,57	1,99	92,4
14:30	22,80	37,72	30,66	35,48	40,13	47,56	47,95	1,43	0,57	1,99	92,4
15:00	22,80	39,00	31,95	35,42	38,70	44,00	45,43	1,01	0,53	1,42	61,3
15:30	22,80	39,24	32,80	36,24	39,31	43,91	43,80	1,01	0,53	1,42	61,3
16:00	22,80	39,55	33,72	36,21	38,45	41,83	42,63	0,56	0,50	0,84	28,7
16:30	22,80	39,43	34,13	36,64	38,74	41,64	41,17	0,56	0,50	0,84	28,7
17:00*	22,80	39,37	34,61	35,64	36,76	38,76	40,37	0,19	0,46	0,27	1,3
17:30*	22,80	42,09	34,61	35,64	36,76	38,76	40,37	0,19	0,46	0,27	1,3
18:00*	22,80	44,03	34,61	35,64	36,76	38,76	40,37	0,00	0,00	0,00	0,0
18:10*	22,80	45,02	34,61	35,64	36,76	38,76	40,37	0,00	0,00	0,00	0,0

TABELA A.18

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de outubro.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	144400	175,00	175,00	2,60	1,90	1297,18	1297,18	350,60	280,60
17:30*	144560	179,00	179,00	2,50	1,80	1324,76	1324,76	340,60	270,60
18:00*	144720	200,00	200,00	2,40	1,80	1469,55	1469,55	330,60	270,60
18:10*	144780	202,00	201,00	2,50	1,80	1483,34	1476,45	340,60	270,60

TABELA A.19

Resultados experimentais da simulação – Mês de novembro. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
07:00	22,90	26,26	24,97	26,01	26,87	27,12	28,22	0,52	0,39	0,81	10,2
07:30	22,90	26,26	25,32	26,35	27,1	27,32	28,24	0,52	0,39	0,81	10,2
08:00	22,90	26,26	25,62	26,62	27,29	27,54	28,43	0,90	0,37	1,30	18,1
08:30	22,90	26,28	25,37	26,16	26,82	27,58	27,10	0,90	0,37	1,30	18,1
09:00	22,90	26,31	25,32	28,66	30,68	33,00	29,36	1,23	0,44	1,66	53,4
09:30	22,90	27,08	25,63	28,49	30,92	34,69	34,64	1,23	0,44	1,66	53,4
10:00	22,90	27,66	25,66	29,11	32,07	36,60	35,88	1,59	0,46	2,07	64,1
10:30	22,90	28,63	25,66	29,06	32,07	36,89	36,92	1,59	0,46	2,07	64,1
11:00	22,90	29,52	25,77	30,32	34,40	40,86	40,06	1,78	0,51	2,42	85,2
11:30	22,90	31,17	26,06	30,41	34,49	41,36	41,73	1,78	0,51	2,42	85,2
12:00	22,90	32,60	26,66	31,15	35,36	42,40	42,61	1,81	0,53	2,32	87,2
12:30	22,90	34,01	27,54	31,98	36,14	43,16	43,43	1,81	0,53	2,32	87,2
13:00	22,90	35,29	28,61	33,00	37,08	43,89	44,16	1,62	0,55	2,20	85,9
13:30	22,90	36,52	29,83	34,22	38,25	44,99	45,22	1,62	0,55	2,20	85,9
14:00	22,90	37,61	31,03	34,51	37,68	42,97	43,86	1,37	0,52	1,88	68,8
14:30	22,90	38,09	31,90	35,40	38,46	43,32	43,24	1,37	0,52	1,88	68,8
15:00	22,90	38,40	32,76	35,55	37,99	41,89	42,42	0,97	0,52	1,37	56,1
15:30	22,90	38,55	33,33	36,15	38,49	42,02	41,68	0,97	0,52	1,37	56,1
16:00	22,90	38,53	33,92	35,16	36,38	38,56	40,25	0,57	0,48	0,71	30,3
16:30	22,90	38,65	32,97	34,55	35,77	37,08	35,84	0,57	0,48	0,71	30,3
17:00*	22,90	38,75	32,67	33,17	34,33	35,61	35,16	0,25	0,43	0,26	15,2
17:30*	22,90	40,84	32,67	33,17	34,33	35,61	35,16	0,25	0,43	0,26	15,2
18:00*	22,90	42,71	32,67	33,17	34,33	35,61	35,16	0,00	0,00	0,00	0,0
18:30*	22,90	45,12	32,67	33,17	34,33	35,61	35,16	0,00	0,00	0,00	0,0

TABELA A.20

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de novembro.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	144810	354,00	175,00	175,00	2,80	1,60	1297,18	1297,18	370,60
17:30*	144925	276,00	193,00	193,00	2,60	1,90	1421,29	1421,29	350,60
18:00*	145040	336,00	200,00	200,00	2,70	2,00	1469,55	1469,55	360,60
18:30*	145262	360,00	200,00	200,00	2,80	2,00	1469,55	1469,55	370,60

TABELA A.21

Resultados experimentais da simulação – Mês de dezembro. \*BDC em funcionamento.

HORA [hh:mm]	T Amb [°C]	T Água [°C]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	S [MJ/m <sup>2</sup> ]	Kt	I [MJ/m <sup>2</sup> ]	POT_E [W]
07:00	21,85	25,12	24,25	26,78	28,57	29,8	29,68	0,56	0,35	0,7	30,7
07:30	21,85	25,2	24,58	26,89	28,59	29,97	29,79	0,56	0,35	0,7	30,7
08:00	21,85	25,21	24,73	27,04	28,79	30,10	29,89	0,87	0,40	1,21	53,6
08:30	21,85	25,51	24,94	26,56	27,98	29,97	29,83	0,87	0,40	1,21	53,6
09:00	21,85	25,74	24,78	27,34	29,32	31,94	30,75	1,26	0,42	1,62	82,1
09:30	21,85	26,21	24,88	27,26	29,34	32,43	32,40	1,26	0,42	1,62	82,1
10:00	21,85	26,66	24,92	28,60	31,65	36,21	34,81	1,52	0,48	2,06	101,5
10:30	21,85	27,82	24,94	28,53	31,84	37,19	37,36	1,52	0,48	2,06	101,5
11:00	21,85	28,82	25,02	29,03	32,71	38,60	38,41	1,66	0,50	2,29	111,6
11:30	21,85	29,98	25,24	29,31	33,12	39,31	39,60	1,66	0,50	2,29	111,6
12:00	21,85	31,06	25,75	30,01	34,03	40,55	40,69	1,65	0,51	2,17	111,3
12:30	21,85	32,23	26,50	30,63	34,56	41,01	41,27	1,65	0,51	2,17	111,3
13:00	21,85	33,27	27,41	31,35	35,07	41,14	41,57	1,40	0,50	2,04	92,9
13:30	21,85	34,13	28,33	32,21	35,83	41,70	41,83	1,40	0,50	2,04	92,9
14:00	21,85	34,95	29,18	32,15	34,83	39,26	40,36	1,33	0,46	1,71	87,2
14:30	21,85	35,10	29,73	32,66	35,14	38,93	38,75	1,33	0,46	1,71	87,2
15:00	21,85	35,34	30,40	33,30	35,80	39,56	39,26	0,91	0,51	1,06	66,4
15:30	21,85	35,64	31,07	33,91	36,42	40,21	39,99	0,91	0,51	1,06	66,4
16:00	21,85	35,93	32,84	35,44	35,93	36,29	38,63	0,54	0,44	0,66	10,1
16:30	21,85	35,74	32,84	35,44	35,93	36,29	38,63	0,54	0,44	0,66	10,1
17:00*	21,85	35,62	32,84	35,44	35,93	36,29	38,63	0,27	0,38	0,47	4,5
17:30*	21,85	40,15	32,84	35,44	35,93	36,29	38,63	0,27	0,38	0,47	4,5
18:00*	21,85	43,79	32,84	35,44	35,93	36,29	38,63	0,00	0,00	0,00	0,0
18:30*	21,85	45,01	32,84	35,44	35,93	36,29	38,63	0,00	0,00	0,00	0,0

TABELA A.22

Resultados experimentais do funcionamento da BDC – Mês de dezembro.

HORA [hh:mm]	W [Wh]	M1 [psi]	M2 [psi]	M3 [bar]	M4 [bar]	M1 [kPa]	M2 [kPa]	M3 [kPa]	M4 [kPa]
17:00*	145262	354,00	175,00	175,00	2,80	1,60	1297,18	1297,18	370,60
17:30*	145491	276,00	193,00	193,00	2,60	1,90	1421,29	1421,29	350,60
18:00*	145720	336,00	200,00	200,00	2,70	2,00	1469,55	1469,55	360,60
18:30*	145951	360,00	200,00	200,00	2,80	2,00	1469,55	1469,55	370,60

## ANEXO B

Neste anexo encontra-se a rotina no software EES para o cálculo do valor de resistência elétrica que seja suficiente para reproduzir a potência equivalente à radiação solar. As equações são referenciadas ao livro Solar Engineering of Thermal Processes (Duffie e Beckman, 2013).

### "DADOS IMPORTANTES"

I=3,1822	"Radiação global"
I <sub>b</sub> =3,4851	"Radiação direta"
I <sub>d</sub> =0,5016	"Radiação difusa"
beta=36	"Inclinação do coletor respeito à horizontal"
delta=-20,92	"Declinação solar para n dia"
K=18	"Cte proporcional - Coef. de extinção"
L=3/1000	"Espessura do vidro cobertor"
omega=-7,5	"Ângulo horário médio"
phi=-19,92	"Latitude da cidade"
I <sub>R</sub> =1,526	"Índice de refletância médio para o vidro com 1 cobertura"
alpha <sub>n</sub> =0,98	"A absorção da placa na incidência normal - Pintura negra"
rho <sub>albedo</sub> =0,39	"Índice de albedo, cor cinza presente nos solos dos prédios"
R <sub>b</sub> =0,796	"Proporção de feixe de radiação em um plano inclinado"

### "REFLEXÃO DA RADIAÇÃO"

"EQ. 1.6.7b - ângulo de incidência sobre a superfície inclinada - radiação direta"	
$\theta_{1b} = \arccos(\cos(\phi + \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\phi + \beta) \cdot \sin(\delta))$	
$\theta_{2b} = \arcsin(\sin(\theta_{1b}) / I_R)$	"EQ. 5.1.4"
$\theta_{1g} = 90 - 0,5788 \cdot \beta + 0,002693 \cdot \beta^2$	"EQ. 5.4.1 - ângulo de incidência da radiação pelo albedo"
$\theta_{2g} = \arcsin(\sin(\theta_{1g}) / I_R)$	
$\theta_{1d} = 59,7 - 0,1388 \cdot \beta + 0,001497 \cdot \beta^2$	"EQ. 5.4.2 - ângulo de incidência da radiação difusa"
$\theta_{2d} = \arcsin(\sin(\theta_{1d}) / I_R)$	

"Componente perpendicular, componente paralelo da radiação não polarizada e média da reflexão da radiação não polarizada"

$$r_{1b} = \frac{(\sin(\theta_{2b} - \theta_{1b}))^2}{(\sin(\theta_{2b} + \theta_{1b}))^2}$$
$$r_{2b} = \frac{(\tan(\theta_{2b} - \theta_{1b}))^2}{(\tan(\theta_{2b} + \theta_{1b}))^2}$$
$$r_{1g} = \frac{(\sin(\theta_{2g} - \theta_{1g}))^2}{(\sin(\theta_{2g} + \theta_{1g}))^2}$$
$$r_{2g} = \frac{(\tan(\theta_{2g} - \theta_{1g}))^2}{(\tan(\theta_{2g} + \theta_{1g}))^2}$$
$$r_{1d} = \frac{(\sin(\theta_{2d} - \theta_{1d}))^2}{(\sin(\theta_{2d} + \theta_{1d}))^2}$$
$$r_{2d} = \frac{(\tan(\theta_{2d} - \theta_{1d}))^2}{(\tan(\theta_{2d} + \theta_{1d}))^2}$$

"A transmitância da radiação inicialmente não polarizada é a transmitância média dos dois componentes"

$$\tau_{rb}=(1/2)*((1-r_{2b})/(1+r_{2b}))+((1-r_{1b})/(1+r_{1b}))$$

$$\tau_{rg}=(1/2)*((1-r_{2g})/(1+r_{2g}))+((1-r_{1g})/(1+r_{1g}))$$

$$\tau_{rd}=(1/2)*((1-r_{2d})/(1+r_{2d}))+((1-r_{1d})/(1+r_{1d}))$$

"Absortância do vidro"

$$\tau_{ab}=\text{EXP}(-(K*L)/(\text{COS}(\theta_{2b})))$$

$$\tau_{ag}=\text{EXP}(-(K*L)/(\text{COS}(\theta_{2g})))$$

$$\tau_{ad}=\text{EXP}(-(K*L)/(\text{COS}(\theta_{2d})))$$

"Propriedades óticas do sistema de cobertura"

$$\tau_b=\tau_{ab}*((1-r_{1b})/(1+r_{1b}))*(1-r_{1b}^2)/(1-r_{1b}*\tau_{ab}^2)$$

$$\tau_g=\tau_{ag}*((1-r_{1g})/(1+r_{1g}))*(1-r_{1g}^2)/(1-r_{1g}*\tau_{ag}^2)$$

$$\tau_d=\tau_{ad}*((1-r_{1d})/(1+r_{1d}))*(1-r_{1d}^2)/(1-r_{1d}*\tau_{ad}^2)$$

$$\rho_b=r_{1b}*(1+\tau_{ab}*\tau_b)$$

$$\rho_g=r_{1g}*(1+\tau_{ag}*\tau_g)$$

$$\rho_d=r_{1d}*(1+\tau_{ad}*\tau_d)$$

$$\alpha_b=(1-\tau_{ab})*((1-r_{1b})/(1-r_{1b}*\tau_{ab}))$$

$$\alpha_g=(1-\tau_{ag})*((1-r_{1g})/(1-r_{1g}*\tau_{ag}))$$

$$\alpha_d=(1-\tau_{ad})*((1-r_{1d})/(1-r_{1d}*\tau_{ad}))$$

"Dependência angular da absortância solar"

$$\alpha_{nb}=1-1,5879*10^{(-3)}*\theta_{1b}+2,7314*10^{(-4)}*\theta_{1b}^2-2,3026*10^{(-5)}*\theta_{1b}^3+9,0244*10^{(-7)}*\theta_{1b}^4-1,8000*10^{(-8)}*\theta_{1b}^5+1,7734*10^{(-10)}*\theta_{1b}^6-6,9937*10^{(-13)}*\theta_{1b}^7$$

$$\alpha_{ng}=1-1,5879*10^{(-3)}*\theta_{1g}+2,7314*10^{(-4)}*\theta_{1g}^2-2,3026*10^{(-5)}*\theta_{1g}^3+9,0244*10^{(-7)}*\theta_{1g}^4-1,8000*10^{(-8)}*\theta_{1g}^5+1,7734*10^{(-10)}*\theta_{1g}^6-6,9937*10^{(-13)}*\theta_{1g}^7$$

$$\alpha_{nd}=1-1,5879*10^{(-3)}*\theta_{1d}+2,7314*10^{(-4)}*\theta_{1d}^2-2,3026*10^{(-5)}*\theta_{1d}^3+9,0244*10^{(-7)}*\theta_{1d}^4-1,8000*10^{(-8)}*\theta_{1d}^5+1,7734*10^{(-10)}*\theta_{1d}^6-6,9937*10^{(-13)}*\theta_{1d}^7$$

"Produto transmitância-absortância"

$$\tau_{\alpha b}=1,01*\tau_b*\alpha_{nb}*\alpha_n$$

$$\tau_{\alpha g}=1,01*\tau_g*\alpha_{ng}*\alpha_n$$

$$\tau_{\alpha d}=1,01*\tau_d*\alpha_{nd}*\alpha_n$$

"Desenvolvimento dos cálculos da potência S"

$$S=I_b*R_b*\tau_{\alpha b}+I_d*\tau_{\alpha d}*(((1+\cos(\beta))/2))+\rho_{\text{albedo}}*I*\tau_{\alpha g}*(((1-\cos(\beta))/2))$$

**"CÁLCULO DAS PERDAS TOTAIS DO COLETOR E POTÊNCIA ELÉTRICA NECESSÁRIA PARA A SIMULAÇÃO."**

tam=23+273 "temperatura ambiente"  
 t\_c=40+273 "temperatura da cobertura"  
 T\_ag=50 "temperatura da água"  
 T\_eag=23+273 "temperatura de entrada da água"  
 tpm=373 "temperatura média representativa"  
 g=9,81 "gravidade"  
 N=1 "número de coberturas"  
 esp=25/1000  
 emit=0,95 "emitância da placa"  
 e\_g=0,88 "emitância do vidro"  
 tensa=5,67\*10<sup>(-8)</sup> "tenção superficial da agua"  
 teta\_c=36 "Inclinação do coletor"  
 h\_w=10  
 k\_in=0,045  
 L\_inb=0,05  
 L\_ine=0,025  
 P\_c=6,4  
 L\_inK=0,1  
 Ar\_c=2,4

"Dados dos tubos"

N\_Tv=8  
 d=10/1000

"Cálculo do U\_T"

$$f=(1+(0,089*h_w)-((0,1166*h_w*emit)))*(1+0,07866*N)$$

$$C=520*(1-0,000051*teta_c^2)$$

$$e=0,430*(1-100/(tpm))$$

$$U_T=((N/((C/Tpm)*((tpm-tam)/(N+f))^e)+(1/h_w))^-$$

$$1)+((tensa*(tpm+tam)*(tpm^2+tam^2))/((emit+(0,00591*N*h_w))^-1)+(((2*N)+f-1+(0,133*emit))/e_g)-N))$$

"Cálculo do U\_b"

$$U_b=k_{in}/L_{inb}$$

"Cálculo do U\_e"

$$U_e=((k_{in}/L_{ine})*P_c*L_{inK})/Ar_c$$

"Cálculo das perdas totais"

$$U_L=(U_T+U_b+U_e)$$

"Calcular a eficiência térmica da superfície absorvedora"

$$W=0,12$$

$$k_{\text{condu}}=385$$

$$\Delta p=0,0005$$

$$F_{\text{eficiencia}}=\tanh((m*(W-d))/2)/((m*(W-d))/2)$$

$$m=\sqrt{U_L/(k_{\text{condu}}*\Delta p)}$$

"Calcular o coeficiente de transferência de calor convectivo para o escoamento"

$$Re=(4*m_{\text{dot}}/N_{\text{Tv}})/(\pi*d*\mu)$$

$$m_{\text{dot}}=0,011$$

$$\mu=\text{Viscosity}(\text{Water};T=T_{\text{ag}};x=0)$$

$$Pr=\text{Prandtl}(\text{Water};T=T_{\text{ag}};x=0)$$

$$k_{\text{ag}}=\text{Conductivity}(\text{Water};T=T_{\text{ag}};x=0)$$

"Pela tabela 3.14.1 do capítulo 3, faz-se interpolação conhecendo o número de Prandtl"

$$a=0,00347$$

$$b=0,0105$$

$$mm=1,16$$

$$nn=1,173$$

$$Nuss_{\text{inf}}=4,4$$

$$Nuss=Nuss_{\text{inf}}+((a*(Re*Pr*d/L)^{mm})/(1+b*(Re*Pr*d/L)^{nn}))$$

$$h_{\text{fi}}=Nuss*k_{\text{ag}}/d$$

"Cálculo do fator de eficiência do coletor"

$$F_{\text{fator}}=(1/U_L)/(W*((1)/(U_L*(d+(W-d)*F_{\text{eficiencia}}))+1)/(\pi*d*h_{\text{fi}}))$$

$$F_{\text{duaslinhas}}=(m_{\text{dot}}*4198/(Ar_c*U_L*F_{\text{fator}}))*(1-\exp(-(Ar_c*U_L*F_{\text{fator}})/(m_{\text{dot}}*4198)))$$

$$F_R=F_{\text{duaslinhas}}*F_{\text{fator}}$$

"Cálculo da potência elétrica necessária pra simulação"

$$POT=W*F_{\text{fator}}*S*Ar_c$$

$$POT_W=(POT*10^6)/3600$$

Os resultados da programação para cálculo da resistência elétrica são ilustrados na FIG B.1. Observa-se o valor de 188,8 para potência elétrica.

## Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$a = 0,00347$	$\alpha_{\text{alpha}}\alpha_{\text{nb}} = 0,9802$	$\alpha_{\text{alpha}}\alpha_{\text{nd}} = 0,9447$	$\alpha_{\text{alpha}}\alpha_{\text{ng}} = 0,8116$	$\alpha_b = 0,05697$
$\alpha_d = 0,06176$	$\alpha_g = 0,06445$	$\alpha_n = 0,98$	$Ar_c = 2,4$	$b = 0,0105$
$\beta = 36$ [graus]	$C = 485,6$	$d = 0,01$	$\delta = -20,92$	$\delta_p = 0,0005$
$e = 0,3147$	$emit = 0,95$	$esp = 0,025$	$e_g = 0,88$	$f = 0,8438$
$F_{\text{duaslinhas}} = 0,8349$	$F_{\text{eficiencia}} = 0,9591$	$F_{\text{fator}} = 0,8736$	$F_R = 0,7293$	$g = 9,81$
$h_{\text{ff}} = 296$	$h_w = 10$	$l = 3,182$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	$l_b = 3,485$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	$l_d = 0,5016$ [MJ/m <sup>2</sup> ]
$l_R = 1,526$	$K = 18$ [m <sup>-1</sup> ]	$k_{\text{ag}} = 0,6304$	$k_{\text{condu}} = 385$	$k_{\text{in}} = 0,045$
$L = 0,003$	$L_{\text{inb}} = 0,05$	$L_{\text{ine}} = 0,025$	$L_{\text{ink}} = 0,1$	$m = 6,527$
$mm = 1,16$	$\mu = 0,0005471$	$\dot{m} = 0,011$	$N = 1$	$nn = 1,173$
$Nuss = 4,695$	$Nuss_{\text{inf}} = 4,4$	$N_{T_v} = 8$	$\omega = -7,5$	$\phi = -19,92$
$POT = 0,6795$	$POT_{W'} = 188,8$ [W]	$Pr = 3,629$	$P_c = 6,4$	$Re = 320$
$\rho_{\text{albedo}} = 0,39$	$\rho_b = 0,1394$	$\rho_d = 0,2731$	$\rho_g = 0,5463$	$r_{1b} = 0,0769$
$r_{1d} = 0,1585$	$r_{1g} = 0,3594$	$r_{2b} = 0,01877$	$r_{2d} = 0,000001676$	$r_{2g} = 0,06933$
$R_b = 0,796$	$S = 2,701$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	$t_{\text{am}} = 296$	$\tau_{\text{alpha}_b} = 0,8366$	$\tau_{\text{alpha}_d} = 0,7213$
$\tau_{\text{alpha}_g} = 0,4477$	$\tau_{\text{ab}} = 0,9428$	$\tau_{\text{ad}} = 0,9375$	$\tau_{\text{ag}} = 0,9331$	$\tau_b = 0,8623$
$\tau_d = 0,7714$	$\tau_g = 0,5574$	$\tau_{\text{ib}} = 0,9102$	$\tau_{\text{rd}} = 0,8632$	$\tau_{\text{rg}} = 0,6708$
$t_{\text{ensa}} = 5,670\text{E-}08$	$t_{\text{eta}_c} = 36$	$\theta_{1b} = 37,72$	$\theta_{1d} = 56,64$	$\theta_{1g} = 72,65$
$\theta_{2b} = 23,64$	$\theta_{2d} = 33,19$	$\theta_{2g} = 38,72$	$t_{\text{pm}} = 373$	$T_{\text{ag}} = 50$
$t_c = 313$	$T_{\text{eag}} = 296$	$U_b = 0,9$	$U_e = 0,48$	$U_L = 8,202$
$U_T = 6,822$	$W = 0,12$			

FIGURA B.1 – Resultados da programação para cálculo da resistência elétrica.

FONTE – AUTOR.

## ANEXO C

Neste anexo encontra-se a metodologia da correção de zero feitas nas temperaturas lidas pelos termopares tipo K. Foi usada para esta correção água com gelo a 0°C medida por um termômetro. A TAB. C.1 agrupa as 25 medições e o valor que foi corrigido nas leituras desses termopares nas simulações. Sendo: T0 a temperatura na entrada do compressor, T1 a temperatura na saída do compressor, T2 a temperatura na saída do condensador, T3 a temperatura na entrada do evaporador estático, T4 a temperatura na entrada do coletor, T5 a temperatura no ponto 2 do coletor, T6 a temperatura no ponto 3 do coletor, T7 a temperatura no ponto 4 do coletor e por último, T8 a temperatura na saída do coletor.

TABELA C.1

Correção dos termopares para leitura de 0°C.

<i>Medição</i>	<i>T0</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>	<i>T7</i>	<i>T8</i>
1	1,34	1,27	1,16	1,12	1,02	1,21	1,02	0,93	0,92
2	1,25	1,19	1,07	1,02	0,93	1,13	0,93	0,86	0,84
3	1,24	1,17	1,05	1,01	0,91	1,12	0,90	0,84	0,81
4	1,22	1,14	1,03	0,97	0,86	1,09	0,88	0,82	0,79
5	1,22	1,14	1,03	0,98	0,88	1,10	0,88	0,80	0,78
6	1,25	1,13	1,02	0,99	0,88	1,10	0,88	0,80	0,78
7	1,28	1,17	1,05	1,03	0,97	1,14	0,92	0,85	0,83
8	1,25	1,18	1,06	1,01	0,96	1,13	0,92	0,87	0,84
9	1,24	1,17	1,12	0,99	0,94	1,11	0,91	0,85	0,82
10	1,25	1,18	1,12	1,01	0,94	1,11	0,92	0,85	0,82
11	1,20	1,16	1,05	0,98	0,90	1,12	0,89	0,85	0,82
12	1,16	1,12	1,00	0,95	0,86	1,09	0,86	0,81	0,79
13	1,14	1,09	0,96	0,92	0,83	1,06	0,83	0,79	0,76
14	1,12	1,07	0,95	0,91	0,80	1,04	0,82	0,77	0,75
15	1,13	1,08	0,95	0,91	0,79	1,05	0,81	0,76	0,73
16	1,14	1,06	0,95	0,91	0,79	1,04	0,80	0,75	0,72
17	1,14	1,08	0,95	0,91	0,80	1,05	0,82	0,76	0,74
18	1,14	1,08	0,94	0,90	0,80	1,04	0,82	0,76	0,73
19	1,14	1,08	0,94	0,90	0,79	1,03	0,82	0,76	0,73
20	1,14	1,08	0,95	0,90	0,80	1,03	0,82	0,75	0,73
21	1,15	1,08	0,95	0,92	0,81	1,02	0,83	0,77	0,74
22	1,16	1,10	0,97	0,94	0,83	1,04	0,86	0,78	0,76
23	1,23	1,12	1,03	0,98	1,10	1,06	0,89	0,79	0,81
24	1,31	1,19	1,25	1,15	1,62	1,08	0,96	0,84	0,94
25	1,41	1,36	1,53	1,48	2,10	1,17	1,11	0,92	1,11
<b>Correção</b>	<b>1,22</b>	<b>1,13</b>	<b>1,03</b>	<b>0,98</b>	<b>0,88</b>	<b>1,09</b>	<b>0,88</b>	<b>0,80</b>	<b>0,79</b>

FONTE – AUTOR.