



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS BAURU**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA CÁLCULO DA
CAPTAÇÃO DE ENERGIA EM COLETORES SOLARES PLANOS**

LEONARDO CHAMONE CARDOSO

BAURU SP

Novembro – 2016



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS BAURU**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA CÁLCULO DA
CAPTAÇÃO DE ENERGIA EM COLETORES SOLARES PLANOS**

LEONARDO CHAMONE CARDOSO

Orientador: Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Co Orientador: Prof. Dr. Alcides Padilha

**Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia
da UNESP – Campus de
Bauru, como parte dos
requisitos para a obtenção
do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.**

BAURU SP

Novembro – 2016

Cardoso, Leonardo Chamone.

Análise comparativa de métodos para cálculo da
captação de energia em coletores solares planos /
Leonardo Chamone Cardoso, 2016
136 f.

Orientador: Vicente Luiz Scalon

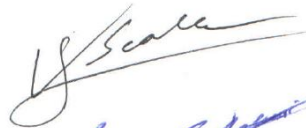
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Energia solar térmica. 2. Coletor solar plano.
3. Eficiência térmica. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LEONARDO CHAMONE CARDOSO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 16 dias do mês de dezembro do ano de 2016, às 09:00 horas, no(a) Sala de reuniões da Seção Técnica da Pós-graduação/FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LEONARDO CHAMONE CARDOSO, intitulada **ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA CÁLCULO DA CAPTAÇÃO DE ENERGIA EM COLETORES SOLARES PLANOS**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON



Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO



Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA



*Tudo posso
naquele que me
fortalece. ”*

Fl 4,13

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Pai pelo dom da vida e pelo entusiasmo que me impulsiona a sempre superar meus limites. Agradeço a Deus Filho, Nosso Senhor Jesus Cristo, que mesmo conhecendo minhas limitações, misérias e fraquezas, derrama a sua misericórdia e seu amor sobre mim todos os dias. Agradeço a Deus Espírito, que me inspira a fazer sempre o melhor, me sustenta diante das provações e sempre me aponta o caminho a seguir.

Agradeço a toda minha família que sempre torceu pela minha felicidade, em especial aos meus pais, Cândido e Maria Alice, pelo apoio incondicional, a minha amada esposa Beatriz, guerreira e companheira de todos os momentos e aos meus filhos Gabriel e Davi (em memória), fontes preciosas de inspiração e amor.

Agradeço a todos os amigos que o Senhor Jesus colocou em meu caminho e foram de grande ajuda para realização deste trabalho, em especial ao Luiz Antônio e Rinaldo Braga (Dadá), grandes mestres em energia solar térmica e com quem eu aprendo todos os dias.

Agradeço a Solis Industria e Comércio de Aquecedor Solar Ltda, que acreditou em mim, que acredita no poder transformador da educação na vida das pessoas e foi decisiva para que este projeto se realizasse. Agradeço também a todos os meus companheiros de trabalho que direta ou indiretamente contribuíram com esta obra.

Agradeço aos meus professores, com quem tanto aprendi. Em especial, agradeço ao Prof. Vicente Luiz Scalon e Prof. Alcides Padilha pelo grande conhecimento, pela grande paciência e sobretudo pela grande generosidade demonstrada ao longo destes anos. Vocês são exemplos de amor a profissão e amor ao próximo. Agradeço também aos colegas Rafael Garcia e Cristiano Pansanato, pelo companheirismo demonstrado no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, gostaria de oferecer este trabalho ao meu amado filho Davi, falecido há poucos meses, que me ensinou a lutar todos os dias pela vida, que me ensinou a sorrir e louvar a Deus diante de tudo, que me ensinou a valorizar as coisas simples da vida. Filho amado, esta vitória eu dedico a você. Te amo!

CARDOSO, L. C. **Análise comparativa de métodos para cálculo de captação de energia em coletores solares planos**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

RESUMO

Atualmente, a aplicação da energia solar térmica para aquecimento de água é uma solução técnica e economicamente viável permitindo a redução do consumo de energia elétrica no setor residencial, comercial e industrial. Diante disto, se faz cada vez mais necessário o domínio de metodologias que permitam quantificar a energia térmica útil captada pelos coletores solares e determinar a sua eficiência na geração de água quente. Como uma forma de contribuir para esta meta, este trabalho desenvolve uma análise comparativa da captação de energia térmica no coletor solar plano. A partir de dados experimentais e teóricos, diferentes modelos para tratamento dos dados foram aplicados e comparados. A metodologia do trabalho consistiu em monitorar um sistema de aquecimento solar residencial, em condições reais de uso e, a partir dos dados obtidos, calcular e comparar a captação de energia térmica útil nos coletores solares baseando-se no balanço energético pela Primeira Lei da Termodinâmica e pelo Método de Eficiência Térmica Instantânea. A irradiação solar global incidente nas placas da placa solar plano também foi monitorada e, portanto, seu valor foi comparado ao modelo teórico. Por fim, a demanda mensal de energia térmica para consumo de água quente da residência também foi monitorada e comparada à captação mensal de energia. A aplicação mostrou coerência entre os resultados experimentais e teóricos em grande parte dos casos, algumas inconveniências em determinadas situações e oportunidades de melhorias, no que é considerado boas práticas de projeto e dimensionamento, conforme destacado no trabalho.

Palavras-chave: Energia Solar Térmica, Coletor Solar Plano, Eficiência Térmica

CARDOSO, L. C. **Comparative analysis methods for calculation energy funding in flat plate solar collectors**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

ABSTRACT

Currently, the application of solar thermal energy for water heating is a technical and economically viable solution allowing the reduction of electricity consumption in the residential, commercial and industrial sector. Given this, it is increasingly the domain methodologies that enable more necessary to quantify the useful thermal energy captured by solar collectors and determine their efficiency in the generation of hot water. As a way to contribute to this goal, this paper develops a comparative analysis of thermal energy harvesting in flat solar collector. From experimental and theoretical data, different models for processing the data were applied and compared. The methodology of the study was to monitor a residential solar heating system in real conditions of use and, from the data, calculate and compare the uptake of useful thermal energy in solar collectors based on the energy balance of the First Law of Thermodynamics and by the Instantaneous Thermal Efficiency Method. The global solar radiation incident on the plates of the solar collector plane was also monitored and therefore its value was compared to the theoretical model. Finally, the monthly demand for hot water thermal energy consumption of the house was also monitored and compared to the monthly energy harvesting. The application showed consistency between experimental and theoretical results in most cases, some inconveniences in certain situations and opportunities for improvement, in what is considered good design practice, as highlighted in the work.

Keywords: Solar Thermal Energy, Flat Plate Solar Collector, Thermal Efficiency

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
SIMBOLOGIA	x
CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Geometria Solar	9
2.2 Modelos de Estimativa de Irradiação Solar.....	10
2.3 Eficiência Térmica	10
2.4 Programa Brasileiro de Etiquetagem	11
CAPITULO 3 - OBJETIVOS.....	13
CAPITULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 Introdução.....	15
4.2 Materiais.....	17
4.2.1 Componentes	17
4.2.2 Instrumentos de Medição	22
4.2.3 Aquisição de Dados	25
4.3. Procedimentos Experimentais	30
4.3.1 Eficiência Térmica	30
4.3.1.1 Método da Primeira Lei da Termodinâmica.....	30
4.3.1.2 Método de Eficiência Térmica Instantânea ou Método das Perdas	32
4.3.2 Produção Mensal de Energia	33
4.3.3 Demanda Mensal de Energia	38
4.3.4. Cálculo de Incerteza.....	39
CAPITULO 5 - RESULTADOS	41
5.1 Temperaturas	42
5.2 Irradiação Solar.....	50
5.3 Vazão Volumétrica	54
5.4 Eficiência Térmica	57
5.5 Produção Mensal de Energia	62
5.6 Demanda Mensal de Energia.....	67

CAPITULO 6 - CONCLUSÕES	71
CAPITULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXO A – ÂNGULOS SOLARES	78
ANEXO B – IRRADIAÇÃO SOLAR.....	86
ANEXO C – ENSAIO DE EFICIÊNCIA TÉRMICA.....	92
ANEXO D – CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	99
ANEXO E – EFICIÊNCIA TÉRMICA INSTANTÂNEA	102
ANEXO F – PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS	106
ANEXO G – CALIBRAÇÃO INSTRUMENTAÇÃO.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Dez principais países do mundo em placas solares instalados em 2014 (valores absolutos em MWth). Fonte: IEA – Solar Heat Worldwide 2016	1
Figura 1.2 – Evolução do mercado de aquecedores solares no Brasil. Fonte: ABRAVA / DASOL - Revista Sol Brasil, edição nº30.....	2
Figura 1.3- Participação das fontes no aquecimento de água para banho nos domicílios. Fonte: EPE-PNE 2050.....	3
Figura 1.4 – Componentes placa solar e reservatório térmico. Fonte: Solis	3
Figura 1.5 – Sistema de aquecimento solar circulação natural ou termosifão.....	4
Figura 1.6 – Sistema de aquecimento solar circulação forçada ou bombeado.....	5
Figura 1.7 – Sistema de aquecimento solar circulação forçada ou bombeado. Fonte: IEA – Solar Heat Worldwide 2016.....	5
Figura 2.1 – Diagrama de blocos para modelos de estimativa de irradiação solar. Fonte: Guimarães (1995).....	10
Figura 4.1 – Pontos de monitoração para cálculo de energia térmica captadas nas placas solares.	15
Figura 4.2 – Pontos de monitoração para cálculo da demanda de energia térmica.	16
Figura 4.3 – Placas solares instaladas.	18
Figura 4.4 – Reservatório térmico instalado.	19
Figura 4.5 – Eletrobomba.....	20
Figura 4.6 -Tubulação hidráulica. Fonte: Eluma/Paranapanema.	20
Figura 4.7 – Controlador diferencial de temperatura. Fonte: Full Gauge Controls Ltda.....	21
Figura 4.8 – Esquema de ligação elétrica. Fonte: Full Gauge Controls Ltda.....	21
Figura 4.9 – Posição de fixação dos sensores de temperaturas no sistema.....	22
Figura 4.10 – Medidor de vazão volumétrica das placas solares.	23
Figura 4.11 – Medidor de vazão volumétrica para consumo água quente.....	24
Figura 4.12 – Piranômetro em condição de instalação.	24
Figura 4.13 – Conversor de dados.	25
Figura 4.14 – Expansor de dados. Fonte: Full Gauge Controls Ltda.....	26
Figura 4.15 – Expansores de dados em condições de uso.....	27
Figura 4.16 – Conversores digital/analógico em condições de uso.....	27

Figura 4.17 – Software de gerenciamento.....	28
Figura 4.18 – Esquema de conexão elétrica e interface entre instrumentação.....	29
Figura 4.19 – Medidor de energia elétrica.	29
Figura 4.20 – Volume de controle na placa solar.	32
Figura 4.21 – Associação de placas solares.	36
Figura 5.1 – Temperaturas experimentais e teóricas na entrada nas placas solares.	43
Figura 5.2 – Temperaturas experimentais na saída das placas solares.	43
Figura 5.3 – Temperaturas experimentais ambiente.....	44
Figura 5.4 – Temperaturas teóricas ambiente.....	44
Figura 5.5 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, março de 2016.....	45
Figura 5.6 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, junho de 2015.	45
Figura 5.7 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, setembro de 2015.....	46
Figura 5.8 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, dezembro de 2015.....	46
Figura 5.9 – Temperaturas experimentais nas placas solares e ambiente.	47
Figura 5.10 – Temperatura de entrada nas placas solares e ambiente experimental e teórica.	48
Figura 5.11 – Temperaturas experimentais no reservatório térmico e ambiente.....	49
Figura 5.12 – Irradiação solar experimental.....	50
Figura 5.13 – Irradiação solar teórica.	51
Figura 5.14 – Irradiação solar teórica e experimental, março de 2016.....	52
Figura 5.15 – Irradiação solar teórica e experimental, junho de 2015.....	52
Figura 5.16 – Irradiação solar teórica e experimental, setembro de 2015.	53
Figura 5.17 – Irradiação solar teórica e experimental, dezembro de 2015.	53
Figura 5.18 – Irradiação solar teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.....	54
Figura 5.19 – Vazões volumétricas experimentais e teórica nas placas solares.....	55
Figura 5.20 – Vazões volumétricas experimentais e teórica nas placas solares em dos 12 meses.....	56
Figura 5.21 – Tempo de funcionamento diário da bomba hidráulica ao longo dos 12 meses.	57
Figura 5.22 – Eficiências térmicas experimentais.	58
Figura 5.23 – Eficiências térmicas teóricas.....	58
Figura 5.24 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, março de 2016.....	59
Figura 5.25 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, junho de 2015.....	60
Figura 5.26 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, setembro de 2015.	60
Figura 5.27 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, dezembro de 2015.	60
Figura 5.28 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.....	62

Figura 5.29 – Produção mensal de energia específica experimental.	63
Figura 5.30 – Produção mensal de energia específica teórica.	64
Figura 5.31 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, março de 2016.	65
Figura 5.32 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, junho de 2015.	65
Figura 5.33 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, setembro de 2015.	65
Figura 5.34 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, dezembro de 2015.	66
Figura 5.35 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental ao longo dos 12 meses.	67
Figura 5.36 – Consumo de água quente experimental e teórico ao longo dos 12 meses.	68
Figura 5.37 – Produção e demanda mensais de energia e consumo mensais de energia elétrica ao longo dos 12 meses.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1 – Meses válidos.....	41
Tabela 5-2 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente.....	47
Tabela 5-3 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente.....	48
Tabela 5-4 – Temperaturas experimentais e teóricas de entrada nas placas solares.....	49
Tabela 5-5 – Temperaturas experimentais na entrada e saída no reservatório térmico.	49
Tabela 5-6 – Irradiação solar teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.....	54
Tabela 5-7 – Vazões volumétricas experimentais e teóricas nas placas solares.	56
Tabela 5-8 – Tempo funcionamento da bomba hidráulica em média diária em 12 meses.	57
Tabela 5-9 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.	62
Tabela 5-10 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental ao longo dos 12 meses.....	67
Tabela 5-11 – Consumo de água quente experimental e volume do reservatório térmico.	68
Tabela 5-12 – Produção mensal de energia e demanda mensal de energia ao longo dos 12 meses.....	69
Tabela 5-13 – Consumo mensal energia elétrica e demanda mensal de energia em dos 12 meses.....	70
Tabela 5-14 – Consumo mensal energia elétrica e produção mensal de energia em 12 meses.	70

SIMBOLOGIA

SÍMBOLOS GREGOS

α	Absortividade da placa absorvedora da placa solar.
α_s	Ângulo de altitude solar [°]
β	Ângulo de inclinação da placa solar [°]
γ	Ângulo azimutal de superfície [°]
δ	Declinação do Sol [°]
ΔT	Diferença entre temperatura ambiente máxima e mínima [°C].
η	Eficiência térmica.
θ	Ângulo de incidência da irradiação direta [°]
θ_z	Ângulo zenital [°]
ρ	Massa específica [kg/m ³].
ρ_g	Reflectância da vizinhança para a irradiação difusa.
τ	Transmissividade do vidro da placa solar.
ϕ	Latitude [°]
ω	Ângulo horário [°]
ω_R	Incerteza resultante.
ω_s	Ângulo horário correspondente ao pôr do sol [°]

SÍMBOLOS ROMANOS

a	Constante empírica.
-----	---------------------

A_u	Área útil ou área transparente da placa solar [m ²].
A_{ext}	Área externa da placa solar [m ²].
b	Constante empírica.
c	Constante empírica.
c_p	Calor específico a pressão constante [kJ/kg °C].
d	Dia do ano.
DME	Demanda mensal de energia [MJ/mês].
E_{VC}	Energia no volume de controle [J].
F_R	Fator de remoção de calor da aleta ou placa absorvedora para a água.
$F_R U_L$	Perdas térmicas da placa solar [W/m ² °C].
$F_R \tau \alpha$	Ganhos térmicos da placa solar.
G	Irradiação solar global incidente no plano da placa solar [MJ/m ²].
G_b	Irradiação solar direta incidente no plano da placa solar [MJ/m ²].
G_d	Irradiação solar difusa incidente no plano da placa solar [MJ/m ²].
G_{sc}	Constante solar, 1367 W/m ² .
g	Aceleração da gravidade, 9,81 m/s ² .
h	Altitude da estação meteorológica [km].
h_e	Entalpia específica de entrada [kJ/kg].
h_s	Entalpia específica de saída [kJ/kg].
H	Irradiação global média diária em superfície horizontal [MJ/m ²].
H_d	Irradiação difusa média diária em superfície horizontal [MJ/m ²].
\bar{H}	Irradiação global diária média mensal em superfície horizontal

	[MJ/m ²].
\bar{H}_c	Irradiação global diária média mensal, em condições de céu claro, para a localidade e mês em questão [MJ/m ²].
\bar{H}_o	Irradiação extraterrestre incidente sobre uma superfície horizontal [MJ/m ²].
\bar{H}_d	Componente difusa da irradiação global diária média mensal [MJ/m ²].
HS	Hora solar.
I	Irradiação global média horária em superfície horizontal [MJ/m ²].
I_b	Irradiação direta média horária em superfície horizontal [MJ/m ²].
I_d	Irradiação difusa média horária em superfície horizontal [MJ/m ²].
I_T	Irradiação global média horária em superfície inclinada [MJ/m ²].
\bar{K}_T	Índice de claridade em média mensal.
K_{ca}	Fator de correção do ângulo de incidência.
L	Longitude [°].
m_{VC}	Massa no volume de controle [kg].
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s].
\dot{m}_e	Vazão mássica de entrada [kg/s].
\dot{m}_s	Vazão mássica de saída [kg/s].
\dot{m}_{teste}	Vazão mássica de teste [kg/s].
\bar{n}	Número de horas de insolação diária média mensal [h].
Nd	Número de dias do mês.
Nb	Número de baterias de placas solares.

N_p	Número de placas solares por bateria.
\bar{N}	Número teórico de horas de insolação diária média mensal [horas].
PME	Produção mensal de energia [MJ/mês].
$PMEe$	Produção mensal de energia específica [MJ/mês.m ²].
Q_{cons}	Calor útil consumido pela residência [J].
Q_u	Calor útil absorvido pela água na placa solar [J].
\dot{Q}_{perdas}	Taxa de calor perdido pelo topo, base e laterais da placa solar [W].
\dot{Q}_u	Taxa de calor útil absorvido pela água na placa solar [W].
\dot{Q}_{VC}	Taxa de calor no volume de controle [W].
r_t	Razão entre a irradiação solar global média horária e diária.
r_d	Razão entre a irradiação solar difusa média horária e diária.
R_b	Fator de correção geométrico para irradiação direta.
S	Taxa de energia incidente sobre a placa absorvedora [W/m ²].
T_{af}	Temperatura de água fria na entrada do reservatório térmico [°C].
T_{aq}	Temperatura de água quente na saída do reservatório térmico[°C].
T_{amb}	Temperatura do ar ambiente [°C].
T_{ep}	Temperatura de entrada nas placas solares [°C].
T_{max}	Temperatura ambiente máxima [°C].
T_{min}	Temperatura ambiente mínima [°C].
T_p	Temperatura da aleta ou placa absorvedora da placa solar [°C].
T_{sp}	Temperatura de saída nas placas solares [°C].
U_L	Coeficiente global de perdas térmicas da placa solar [W/m ² °C].

V_{aq}	Consumo diário de água quente [m ³].
V_{ps}	Volume da placa solar a cada 30s [m ³].
V_e	Velocidade de entrada [m/s].
V_s	Velocidade de saída [m/s].
\dot{V}	Vazão volumétrica da água [m ³ /s].
\dot{V}_{ps}	Vazão volumétrica da placa solar [m ³ /s].
W	Trabalho [J].
\dot{W}_{VC}	Taxa de trabalho útil no volume de controle [W].
Z	Altitude [m].
Z_e	Altura de entrada [m]
Z_s	Altura de saída [m]

SUBSCRITOS

<i>Teo</i>	Teórico
<i>Exp</i>	Experimental

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

O mercado global de aquecedores solares começou a crescer a partir da década de 70 impulsionado pela crise do petróleo, mas expandiu significativamente durante a década 90 com as novas crises energéticas. Atualmente, segunda a IEA – International Energy Agency, no relatório Solar Heat Worldwide 2014, edição 2016, há 586 milhões de metros quadrados de placas solares instalado no mundo, o que corresponde a potência térmica de aproximadamente 410 GWth (giga watts térmicos). Ainda neste mesmo relatório, conforme a Fig. 1.1, o Brasil aparece em 5º lugar dentre os 10 principais países do mundo em potência instalada de placas solares para aquecimento de água.

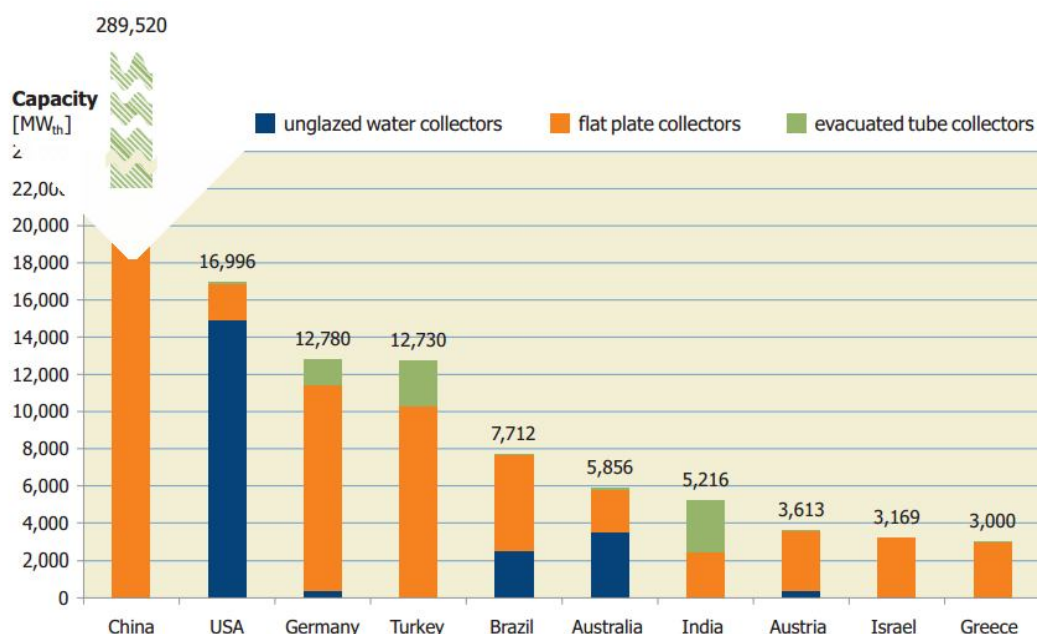


Figura 1.1– Dez principais países do mundo em placas solares instalados em 2014 (valores absolutos em MWth). Fonte: IEA – Solar Heat Worldwide 2016

Este cenário coloca o Brasil em uma posição de liderança e referência para o mercado latino americano em termos de área coletora instalada. Segundo o DASOL, Departamento de Aquecimento Solar da ABRAVA – Associação Brasileira de Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, no ano de 2015 o Brasil produziu mais de 1,4 milhões de metros quadrados de placas solares para aquecimento de água e acumulou uma área total instalada de mais de 12,5 milhões de metros quadrados, conforme Fig. 1.2.

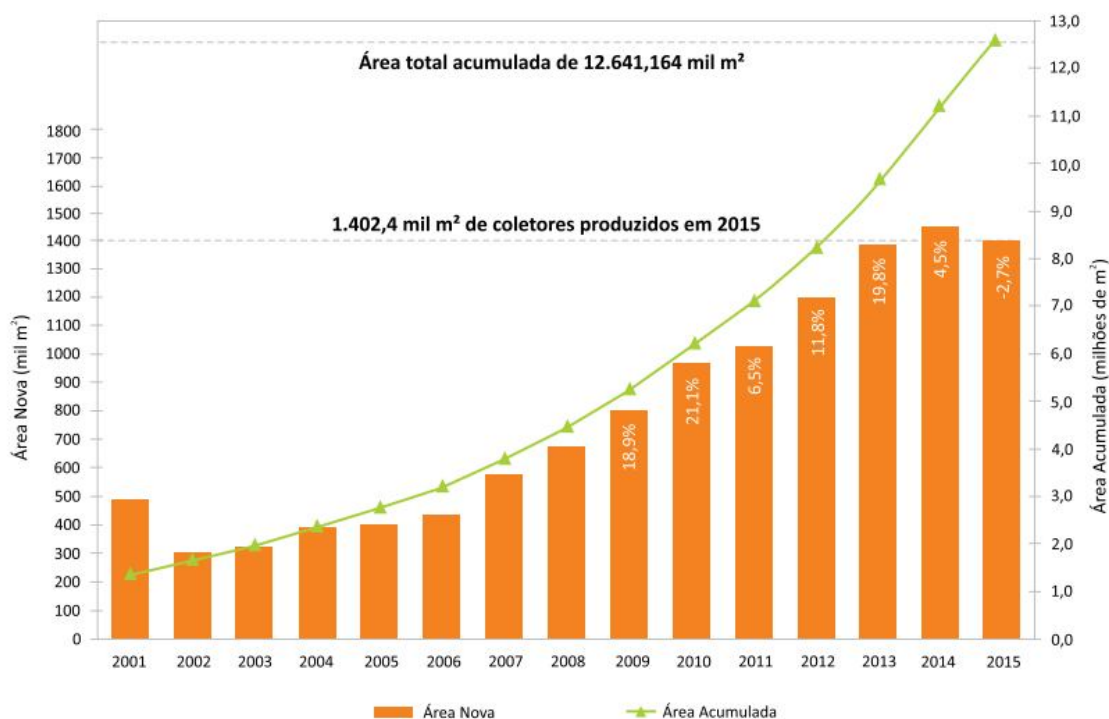


Figura 1.2 – Evolução do mercado de aquecedores solares no Brasil. Fonte: ABRAVA / DASOL - Revista Sol Brasil, edição nº30.

Ainda segundo o DASOL, a área acumulada de placas solares para aquecimento de água no Brasil equivale à geração de 8 TWh de energia elétrica, o que seria suficiente para abastecer um número superior a 6 milhões de residências, considerando-se uma placa solar com área de 2 m² instalado em cada residência. Além disso, essa geração de energia evitou a emissão anual de 2,6 milhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera, ou seja, um efeito semelhante ao obtido com o plantio de 13 milhões de árvores.

Desta forma, a energia solar térmica para aquecimento de água aparece como uma solução técnica e economicamente viável para reduzir os problemas do consumo de energia elétrica no setor residencial e comercial brasileiro. Estudos da EPE - Empresa de Pesquisa Energética, vinculado ao Ministério de Minas e Energia, através do Plano Nacional de Energia 2050 já apontam que o consumo de energia elétrica para aquecimento de água em residências no Brasil, deve cair nas próximas décadas com a substituição dos chuveiros elétricos por aquecedores solares. A previsão é que, em 2050, 24% do aquecimento de água dos domicílios seja feito usando o calor do sol, contra os atuais 5%, conforme Fig. 1.3.

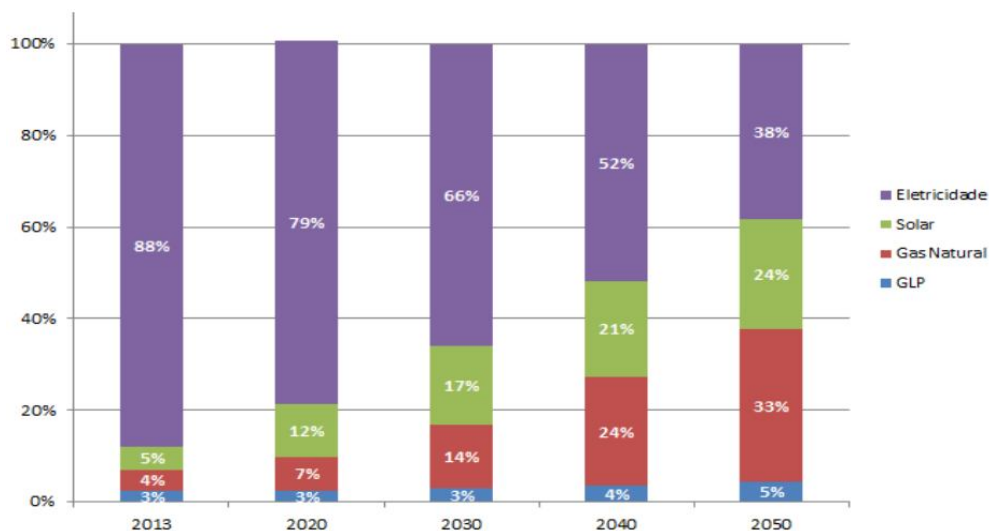


Figura 1.3- Participação das fontes no aquecimento de água para banho nos domicílios. Fonte: EPE-PNE 2050

Paralelo ao desenvolvimento e crescimento mercadológico, é importante entender que o sistema de aquecimento solar é composto de dois componentes principais com funções muito bem definidas, conforme Fig. 1.4, ou seja:

- Placa solar: elemento ativo do sistema de aquecimento solar e responsável para captação da energia solar e transformação em energia térmica na forma de água quente.
- Reservatório térmico: elemento passivo do sistema de aquecimento solar e responsável pela armazenagem da água quente para que seja usada conforme o perfil de consumo do usuário.



Figura 1.4 – Componentes placa solar e reservatório térmico. Fonte: Solis.

Quanto ao funcionamento, a circulação de água entre a placa solar e reservatório térmico, pode ocorrer de dois modos distintos conforme segue:

- Circulação Natural ou Termossifão: corrente de convecção natural da água entre a placa solar e o reservatório térmico, tendo como força motriz a diferença de densidade entre água fria e quente, conforme Fig. 1.5.

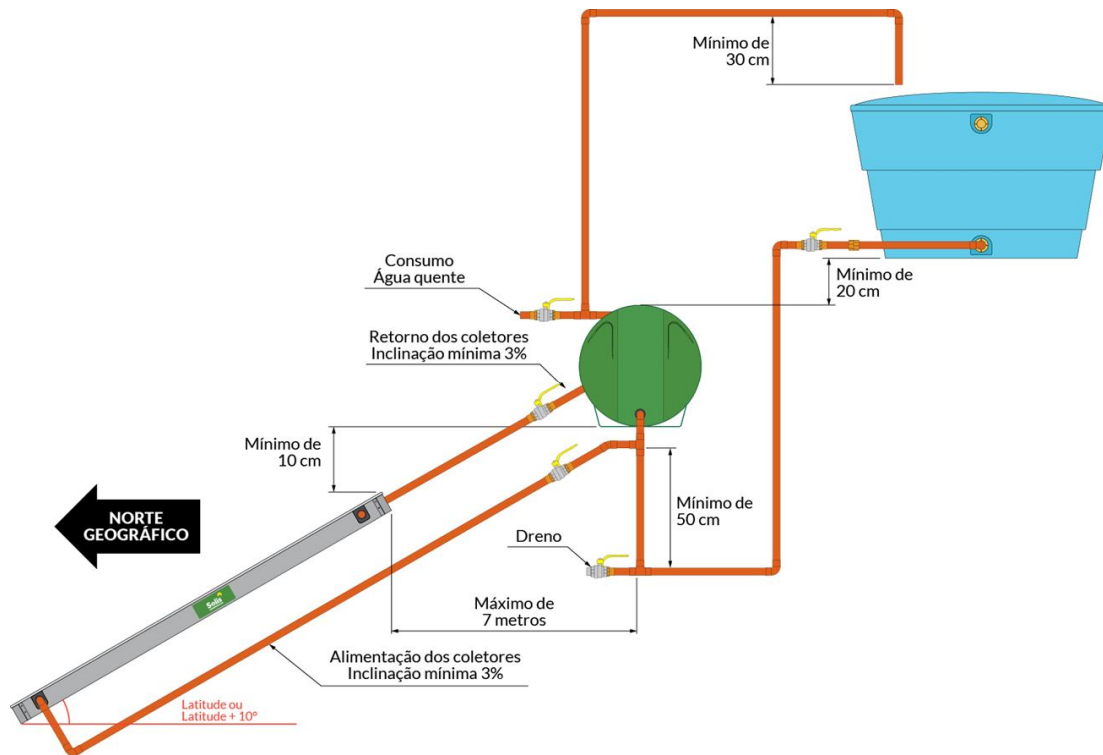


Figura 1.5 – Sistema de aquecimento solar circulação natural ou termossifão.

- Circulação Forçada ou Bombeada: corrente de convecção forçada da água entre a placa solar e o reservatório térmico, tendo como força motriz o uso de uma eletrobomba, conforme Fig. 1.6.

Vale reforçar que, segundo a IEA – International Energy Agency, no relatório Solar Heat Worldwide 2014, edição 2016, mais de $\frac{3}{4}$ dos sistemas de aquecimento solar instalados funcionam por circulação natural ou termossifão, conforme Fig. 1.7.

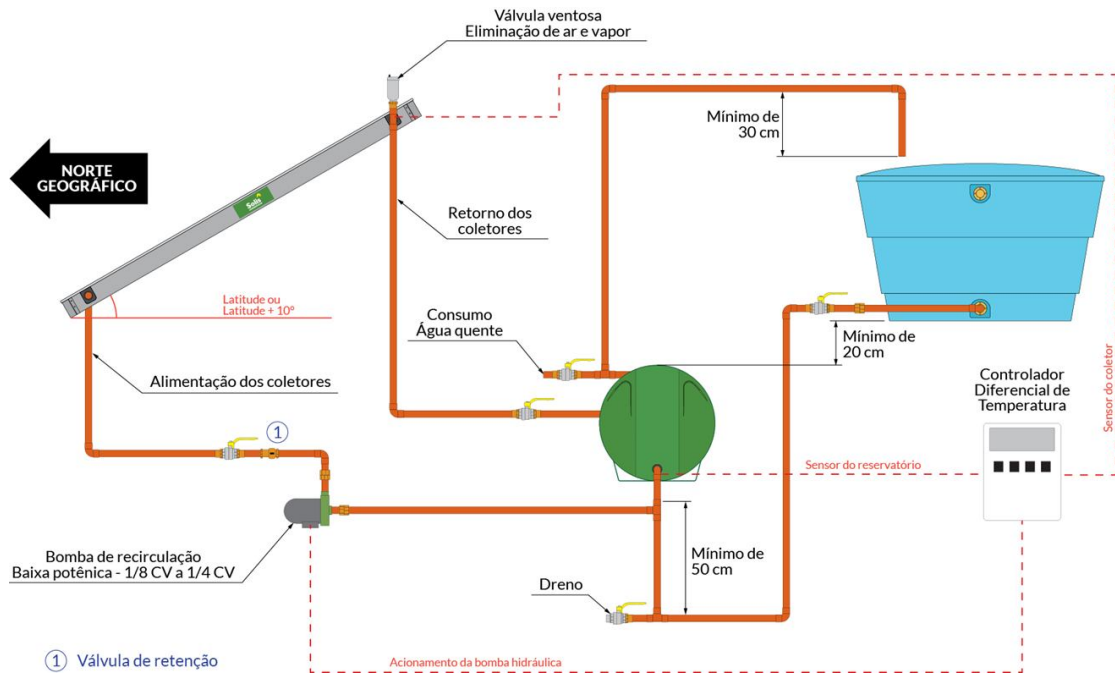


Figura 1.6 – Sistema de aquecimento solar circulação forçada ou bombeado.

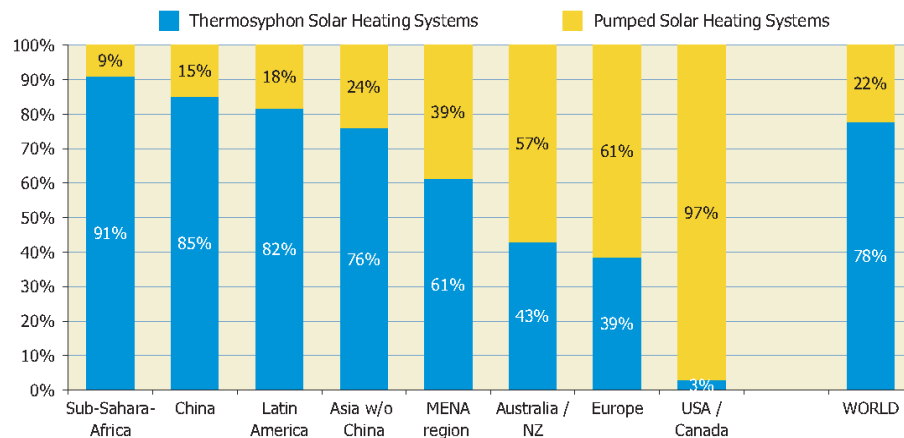


Figura 1.7 – Sistema de aquecimento solar circulação forçada ou bombeado. Fonte: IEA – Solar Heat Worldwide 2016

Assim, surgiram uma série de inovações tecnológicas ao longo das décadas que permitiram aumentar a eficiência dos sistemas de aquecimento solar. Neste sentido, uma avaliação efetiva da operação e parâmetros de funcionamento destas placas solares em comparação com modelos teóricos, obtidos a partir dos resultados dos ensaios de etiquetagem e certificação, pode trazer mais elementos para a melhoria da tecnologia e sua aplicação, diminuindo ainda mais o seu custo efetivo e melhorando a sua eficiência térmica.

CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir apresenta-se uma revisão bibliográfica de trabalhos já realizados, que mais contribuem com a linha de pesquisa proposta. Além disso, são apresentados os conceitos teóricos e práticos que fundamentam os métodos e cálculos adotados no procedimento de aquisição, tratamento e análise dos dados teóricos e experimentais.

A investigação de placas solares de placa plana vem sendo desenvolvida a bastante tempo, desde as primeiras caixas aquecedoras que surgiram no EUA ao final do século XIX. Entretanto, isto não impede que novas tecnologias venham sendo constantemente propostas para aperfeiçoar os dispositivos já existentes. Estas inovações permitem avaliar possibilidades de melhorias eventuais ou ainda a incorporação de novas tecnologias a estes dispositivos. Diversos trabalhos têm sido apresentados recentemente nos mais diversos tópicos de estudo relacionados à aplicação de placas solares planos nos sistemas de aquecimento de água.

Para destacar alguns, no que se refere ao aperfeiçoamento de modelos teóricos de avaliação e dimensionamento de placas solares planas para sistemas de aquecimento de água, são baseados em soluções analíticas e amplamente divulgados na literatura. Estes métodos vêm sendo também avaliados em comparação a dispositivos experimentais como no caso de trabalho Khalifa (1999). Neste estudo os modelos tradicionais de avaliação do coeficiente de perdas são comparados com os valores efetivos e eficiências das placas solares mostrando boa concordância de resultados. Estes modelos clássicos são utilizados até hoje na avaliação do funcionamento dos dispositivos e permitem estimativas adequadas do seu funcionamento nas condições de operação de cada coletor. Pequenos desenvolvimentos do modelo foram feitos desde então e é possível verificar versões atualizadas deste procedimento em trabalhos recentes como Duffie e Beckman (2006) e Kalogirou (2012).

Os modelos para estimativas das condições ambientais em determinados locais também são desenvolvidos nestes modelos globais. Isto é extremamente importante, uma vez que a determinação tanto do ganho como das perdas de energia são diretamente proporcionais a estes parâmetros. Estes modelos ainda continuam a ser estudados e validados, com algumas alterações propostas ao longo do tempo. Um exemplo típico destes estudos é o conceito de dia

típico para avaliar a irradiação solar mensal. Embora amplamente estabelecido, ainda existem estudos recentes no sentido de validá-lo como o caso do trabalho de Wojcicki (2015).

Ainda avaliando os modelos de placas solares, é importante ressaltar que durante muito tempo, dentre os modelos houve a predominância daqueles que se baseavam nas condições de operação em regime permanente. Embora este modelo apresente boas aproximações, a sua validação e a comparação com resultados experimentais é muitas vezes complexa. Este fato se deve principalmente à natureza variável dos parâmetros experimentais. A irradiação solar, os ventos e em certa medida até a temperatura ambiente podem apresentar mudanças bruscas durante o período de teste dificultando a obtenção de parâmetros da placa solar em regime permanente. Em função destas oscilações, as normas de testes de placas solares também vêm sofrendo alterações no sentido de reduzir a constância necessária para os testes estáticos, como mostrado por Fischer et al. (2004). Também em função disto, apareceu a necessidade de determinação de parâmetros dinâmicos de uma placa solar de natureza numérica e diversos trabalhos apareceram com este fim, como o caso de Taherian et al. (2011), onde o modelo numérico é comparado a resultados experimentais.

Neste sentido existem diversos trabalhos disponíveis sendo que, alguns deles, desenvolvidos há bastante tempo. Este é o caso da tecnologia proposta Hussein et al. (1999), que apresenta um modelo numérico e experimental para um dispositivo operando com mudança de fase. O autor, baseando-se em uma série de trabalhos anteriores envolvendo tubos de calor, propõe um modelo numérico para avaliar o funcionamento de uma placa solar envolvendo fluido secundário. A grande vantagem deste tipo de sistemas reside no fato que a temperatura de operação da placa solar e do reservatório possuem variações de temperatura muito pequena. Esta redução na temperatura de operação da placa solar reduz significativamente a sua perda de calor para o meio ambiente. As soluções do modelo numérico baseado em diferenças finitas foram comparadas com os resultados experimentais para a curva de eficiência da placa solar com concordância de resultados. Embora o autor tenha observado apenas aspectos da concordância entre os resultados analíticos experimentais, poder-se-ia verificar que este tipo de coletor apresentou eficiências melhores que placas solares tradicionais para as mesmas condições. Apesar da boa eficiência desta tecnologia, ela possui como um grande inconveniente o aumento do preço final do dispositivo em função do número de componentes presentes. Este é, provavelmente, o maior impedimento no desenvolvimento deste tipo de dispositivos.

Nesta linha de novas tecnologias, Ammari e Nimir (2003) propuseram e construíram uma placa solar que utilizavam o alcatrão como material de armazenamento térmico na parte inferior da placa absorvedora. Na época, diversos testes experimentais foram feitos no sentido de comparar os resultados com o de uma placa solar tradicional operando sob as mesmas condições. Um modelo numérico unidimensional foi elaborado para estimar o comportamento das placas e compará-los aos experimentais. Neste caso, os próprios autores perceberam que havia apenas um pequeno aumento de desempenho no final da tarde, sendo o coletor tradicional mais eficiente ao longo de todo o dia. Assim sendo, resultados preliminares obtidos demonstram a pouca efetividade da placa solar, o que não justificaria a sua utilização.

Uma outra inovação também proposta para melhorar a eficiência das placas solares é a utilização de dispositivos para aumentar a taxa de transferência de calor no interior dos tubos, como discutido por Jaisankar et al. (2009). O trabalho propõe a utilização de fitas retorcidas tipicamente utilizadas para incrementar a troca de calor no interior de tubos. Utilizando estes princípios e fitas retorcidas de diferentes características os autores conseguiram estimar os efeitos da mudança sobre o coeficiente de transferência de calor e do de atrito para as fases onde a irradiação se encontra em elevação (período matutino) e em queda (período vespertino). No caso do trabalho, os resultados apresentados foram focados na determinação do coeficiente de película interna. Entretanto, para avaliação da placa solar, seria mais interessante a apresentação de resultados da eficiência térmica do mesmo. Embora o incremento na transferência de calor interno ao tubo tenha sido demonstrado, seria interessante conhecer o seu efeito sobre a redução na temperatura da placa que tem correlação direta com o coeficiente de perdas e, conseqüentemente, a eficiência.

Dada à relevância deste fato, Ananth e Jaisankar (2013), complementaram o trabalho com diferentes modelos de tiras retorcidas e neste caso, os parâmetros experimentais da placa solar como temperatura de superfície e eficiência térmica são apresentados com destaque. Um outro trabalho abordando o mesmo tema foi desenvolvido por García et al. (2013), mas o estudo foi baseado no diferente espaçamento entre barreiras no interior dos dutos. O coletor modificado foi testado em paralelo a um coletor comum de mesmas características e os resultados para eficiência térmica para o modificado se mostraram superiores ao convencional em, praticamente, todos os casos analisados. Este modelo, com isto já vem ganhando relevância e pode, num futuro breve, ter outros modelos disponíveis no mercado.

Um outro aspecto importante recentemente estudado é a deposição de poeira ao longo da vida útil da placa solar. Embora a maioria dos estudos avalie este parâmetro em placas solares planas, ele também pode ser quantificado para outros tipos. Diversos destes estudos tem sido feito abordando a redução da eficiência ao longo do tempo, sendo que muitos deles são avaliados em regiões desérticas. Neste caso, o período para acúmulo de resíduos é muito pequeno em função das características da própria areia associada à baixa pluviosidade. Abordando este tema merecem destaque o trabalho de Sarver et al. (2013), onde é feito um levantamento de um grande número de trabalhos abordando este aspecto em diferentes locais do mundo. Além disto são analisados importantes aspectos referentes ao cotidiano operacional destes dispositivos incluindo os efeitos do acúmulo de pó e suas características granulométricas sobre a transmitância e refletividade, tecnologias de limpeza e prevenção e ainda o tratamento de normas para padronizar o funcionamento com o tempo. Ainda considerando este aspecto, outro trabalho relevante é apresentado por Ghazi et al. (2014), direcionado principalmente para coletores planos com destaque para os fotovoltaicos. Também neste caso, um destaque especial é dado à utilização de dispositivos autônomos de limpeza em sistemas de grande porte e o impacto na sua eficiência.

2.1 Geometria Solar

Segundo Duffie e Backmann (2006), a relação geométrica entre um plano de qualquer orientação particular em relação à Terra, a qualquer momento, e a irradiação solar direta, isto é, a posição do sol em relação a esse plano, pode ser descrito em termos de vários ângulos. A este agrupamento de ângulos dá-se a denominação de geometria solar, cuja aplicação permite prever um melhor aproveitamento do recurso solar e com isso garantir um melhor rendimento térmico do sistema de aquecimento solar. O conceito de geometria solar inclui relações trigonométricas esféricas e está detalhado no ANEXO A. Sua aplicação é fundamental para que seja possível chegar aos cálculos teóricos de irradiação solar no plano da placa solar e, portanto, a captação de energia útil, respectivamente.

2.2 Modelos de Estimativa de Irradiação Solar

Quando não se dispõe de dados medidos de irradiação solar, para determinada localidade ou região, é possível usar dados teóricos, obtidos a partir de modelos para estimar a irradiação solar. De modo geral, os modelos em questão, partindo de informações relativamente limitadas, como número de horas de insolação, latitude, longitude e altitude do local de referência, permitem calcular as componentes direta e difusa da irradiação média mensal no plano horizontal e corrigi-las para diferentes planos de inclinação, conforme condição de instalação da placa solar. Os modelos de estimativa de irradiação solar global incidente no plano da placa solar encontram-se detalhados no ANEXO B. A Fig. 2.1, proposta por Guimarães (1995), apresenta uma síntese da sequência lógica dos modelos matemáticos. Esta condição permite a análise comparativa da irradiação solar global teórica e experimental, avaliando a coerência entre os resultados.

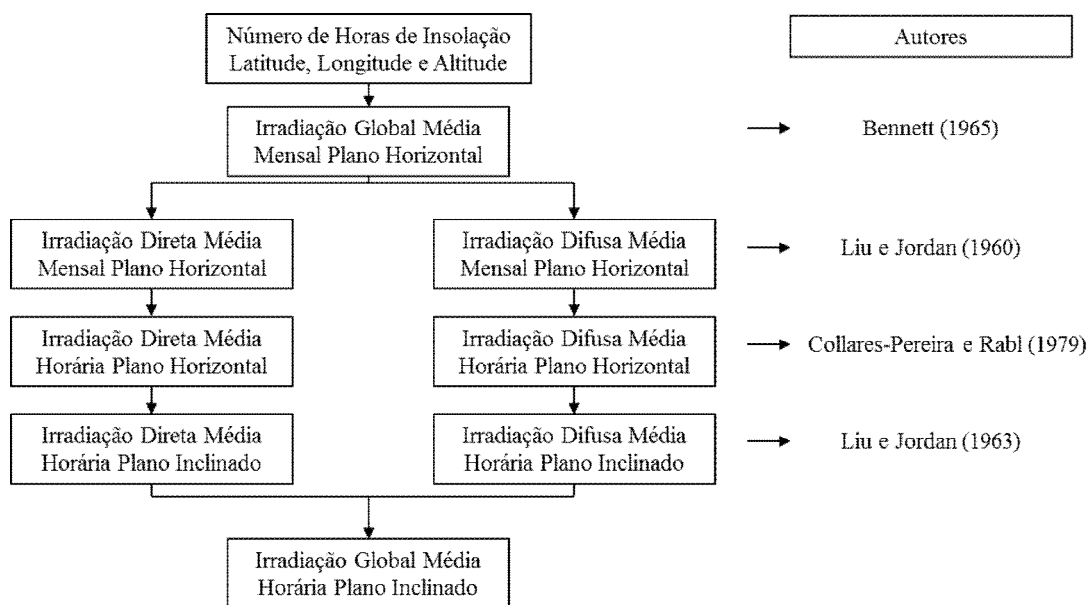


Figura 2.1 – Diagrama de blocos para modelos de estimativa de irradiação solar. Fonte: Guimarães (1995)

2.3 Eficiência Térmica

A eficiência térmica das placas solares pode ser calculada pelo balanço de energia através do Método da Primeira Lei da Termodinâmica. Duffie e Backmann (2006) a define

como a razão entre o ganho útil de energia durante um certo período de tempo especificado e a energia solar incidente no plano da placa solar durante o mesmo período de tempo. Este método de cálculo pode ser adotado em aplicações experimentais, desde que haja monitoração das variáveis de interesse.

Além disso, a eficiência térmica das placas solares também pode ser calculada pelo balanço de energia através do Método de Eficiência Térmica Instantânea, conforme norma americana ANSI/ASHARE Standart 93 – 2003. Este método, permite identificar pontos de otimização no projeto da placa solar, é representado de forma gráfica como um polinômio de 1º grau e também é conhecido como “Método das Perdas”, conforme Pereira et al (2010). A eficiência térmica das placas solares pelo Método das Perdas também pode ser adotada em aplicações teóricas. Normalmente, as variáveis de interesse são provenientes de bancos de dados climatológicos e modelos teóricos.

2.4 Programa Brasileiro de Etiquetagem

O PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem), em seu regulamento específico para uso da ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia) em sua revisão 9 de 2007, adota o método de balanço de energia para cálculo de Eficiência Térmica Instantânea (Método das Perdas). Este método, por sua vez, possibilita o cálculo da captação mensal de energia pela placa solar, também conhecido, pelo mercado, como *PME* (Produção Mensal de Energia em kWh/mês), *PMEe* (Produção Mensal de Energia específica em kWh/mês.m²) e constando na etiqueta do INMETRO como informações de referência para o consumidor final para comparação de produtos. Este método está detalhado no ANEXO C e permite que seja estimada a produção mensal de energia da placa solar em qualquer localidade, desde que se tenha acesso aos parâmetros de projeto da placa solar. É importante ressaltar que, o procedimento pode ser usado em análises comparativas com a produção mensal de energia experimental, afim de se verificar o nível de confiabilidade do método.

O PBE adota a norma americana ANSI/ASHARE Standart 93 – 2003, que tem como premissa básica a condição de regime quase permanente das variáveis. Esta condição torna o ensaio “outdoor” bastante restritivo, em função da dificuldade de se obter dias de céu claro, ou seja, condições ideais para realização dos ensaios. Esta realidade mudou, em 2005, quando entrou em operação o primeiro Simulador Solar da América Latina, localizado no GREEN

(Grupo de Estudos em Energia) na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC Minas, em Belo Horizonte MG. O uso do simulador solar confere aos ensaios agilidade, visto que acaba com a dependência de se obter dias de céu claro. Atualmente o Brasil possui um segundo simulador solar, localizado no Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológica), em São Paulo SP.

Do exposto, utilizando-se dos conceitos teóricos e experimentais, dos métodos de cálculos utilizados e/ou desenvolvidos pelos autores, foi possível estabelecer o tema desta pesquisa e os objetivos do presente trabalho, como apresentados no próximo capítulo.

CAPITULO 3 - OBJETIVOS

Neste contexto de desenvolvimento de novas tecnologias, este trabalho propõe apresentar uma análise comparativa da energia térmica útil captada pelas placas solares em condição real de uso e compará-la aos resultados teóricos calculados a partir das condições de ensaio em laboratório. Para tanto, foi instrumentada uma instalação residencial com alguns dispositivos de medição adicionais e registradores de parâmetros de operação. Resultados experimentais foram calculados a partir de dados monitorados. Os cálculos do rendimento por sua vez, foram realizados com base nos dados fornecidos pela curva de eficiência da placa solar, gerada no processo de etiquetagem e certificação e utilizando-se de dados estatísticos e modelos matemáticos. De posse dos resultados de ambos os casos, pontos de coerência e discrepância entre os resultados foram avaliados e discutidos. Ainda em decorrência desta análise foi possível propor ações corretivas nos parâmetros de projeto, dimensionamento, instalação ou mesmo alterações no sistema de aquecimento solar de modo a aumentar a confiabilidade técnica e melhorar a eficiência térmica de longo prazo. Dentro do contexto exposto, o presente trabalho de pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- Monitorar dados de temperatura, irradiação solar, vazão volumétrica e consumo de água quente comparando-os, quando possível, às respectivas referências teóricas.
- Calcular a captação de energia das placas solares, em condições reais de uso, através dos dados experimentais pelo balanço energético através da Primeira Lei da Termodinâmica;
- Calcular a captação de energia das placas solares, através de modelos teóricos e dados de eficiência térmica fornecido pelo INMETRO, através do balanço energético pelo Método das Perdas;
- Fazer comparação entre os dois métodos anteriores e após analisar os resultados, apontar possíveis justificativas e oportunidades de melhorias nos parâmetros de projeto, dimensionamento e instalação;

- Calcular a demanda de energia térmica pelo consumo real de água quente, monitorar o consumo total de energia elétrica do sistema de aquecimento solar utilizado e fazer uma análise comparativa, em conjunto, com a captação de energia das placas solares em condições reais de uso;

No próximo capítulo são apresentados os materiais envolvidos no experimento, o procedimento de monitoração, aquisição e tratamento de dados. Além disso, são apresentados a metodologia utilizada no cálculo da eficiência térmica, captação de energia das placas solares e cálculos das incertezas.

CAPITULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

A metodologia de trabalho consistiu em monitorar um sistema de aquecimento solar residencial, em condição reais de operação e, a partir dos dados monitorados, calcular a captação de energia térmica nas placas solares e compará-la aos resultados obtidos dos modelos teóricos disponíveis na literatura. A análise térmica dos dados experimentais se baseou nos princípios da Primeira Lei da Termodinâmica e, posteriormente, foi comparada aos dados calculados teoricamente, baseados no Método de Eficiência Térmica Instantânea, também conhecido como Método das Perdas. A Fig. 4.1 ilustra o sistema projetado, construído e instalado, indicando os respectivos pontos de monitoração.

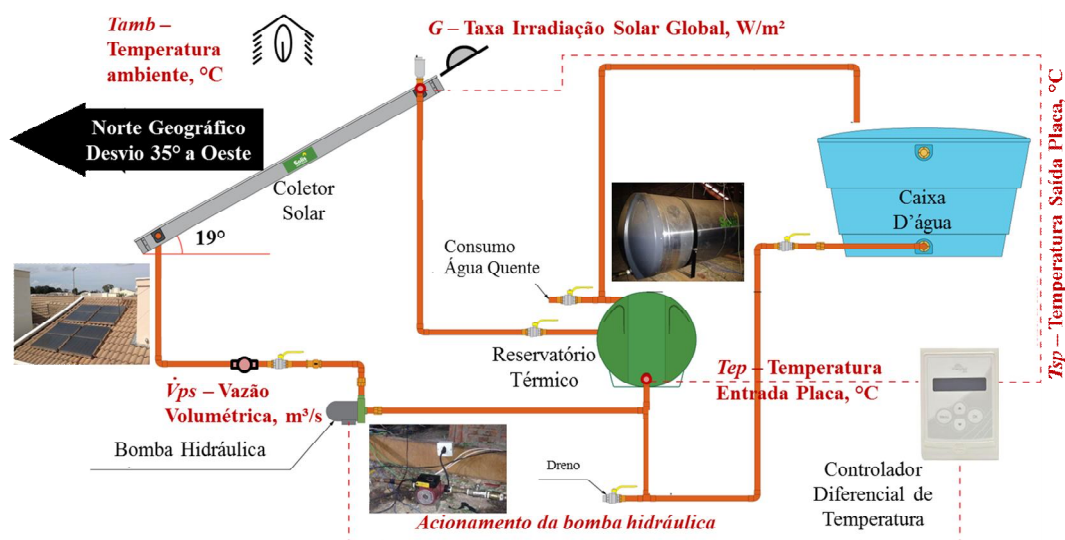


Figura 4.1– Pontos de monitoração para cálculo de energia térmica captadas nas placas solares.

Onde as variáveis monitoradas para cálculo da captação da energia térmica nas placas solares foram:

- T_{amb} , temperatura ambiente, $^\circ\text{C}$;

- T_{ep} , temperatura de entrada da placa solar, °C;
- T_{sp} , temperatura de saída da placa solar, °C;
- G , taxa de irradiação solar global incidente sobre o plano da placa solar, W/m²;
- \dot{V}_{ps} , vazão volumétrica de água na placa solar, m³/s.

Além disso, o experimento permitiu calcular a demanda de energia térmica, a partir do consumo de água quente, relacioná-la à captação de energia térmica nas placas solares e consumo de energia elétrica do sistema de aquecimento solar. A Fig. 4.2 enfatiza os respectivos pontos de monitoração.

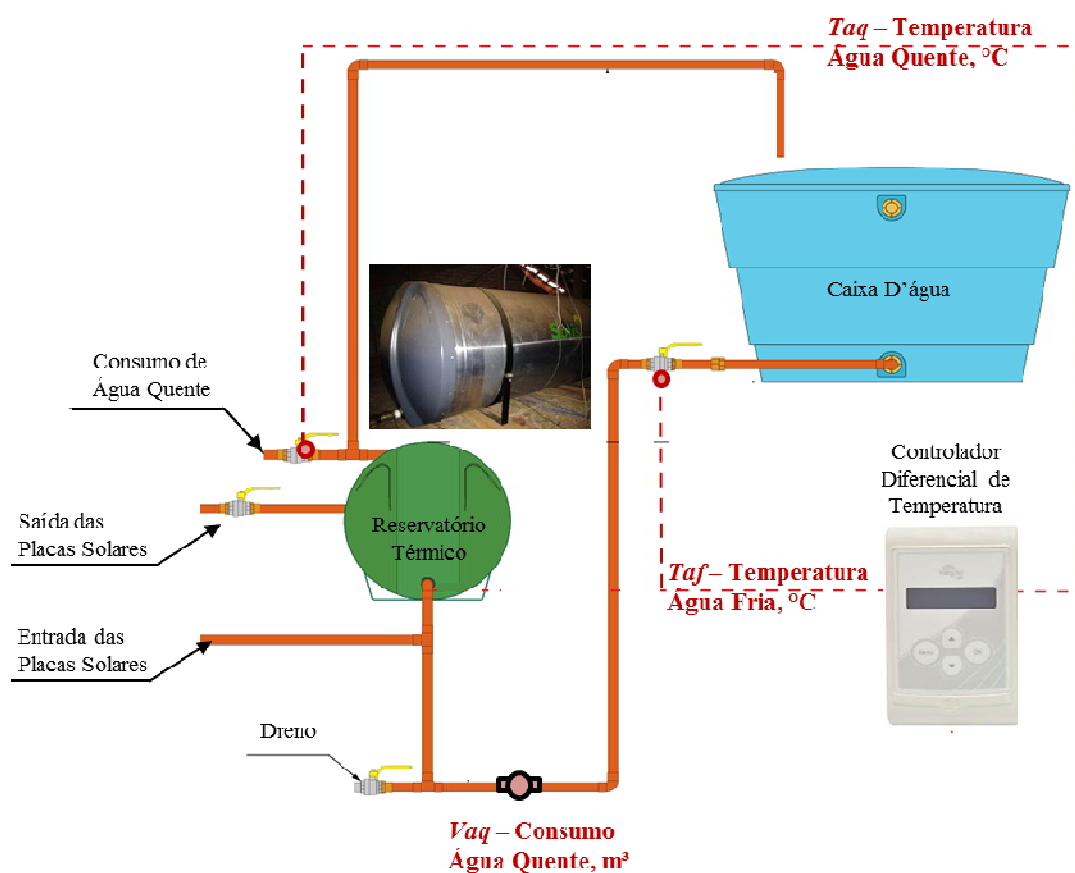


Figura 4.2 – Pontos de monitoração para cálculo da demanda de energia térmica.

Para isso, foi necessário também monitorar outras variáveis, tais como:

- T_{af} , temperatura de água fria na caixa d'água, °C;
- T_{aq} , temperatura de água quente no consumo, °C;
- V_{aq} , volume consumido de água quente, m³;

- *CEE*, consumo de energia elétrica de todo sistema de aquecimento solar, kWh.

Obs.: A temperatura ambiente, T_{amb} , também foi monitorada e utilizada como variável de referência.

4.2 Materiais

A seguir, apresentam-se as características de localização, uso e funcionamento do sistema de aquecimento solar monitorado:

- Local de instalação do sistema de aquecimento solar: Av. Antônio da Silva Nunes n° 2800, Jardim São Conrado, Birigui SP;
- Coordenada geográfica do local de instalação do sistema de aquecimento solar: latitude de $-21,29^\circ$, longitude de $-50,34^\circ$ e altitude de 406 m;
- Número de pessoas da residência: 4 pessoas, sendo 2 adultos e 2 crianças;
- Pontos de consumo de água quente: 2 duchas, 2 lavatórios e 1 torneira na cozinha;
- Orientação geográfica: 35° a oeste do norte geográfico;
- Inclinação do telhado utilizado: 19° em relação ao plano horizontal;
- Pressão de operação do sistema de aquecimento solar: 18,0 kPa e aberto a pressão atmosfera (respiro);
- Circulação de água entre as placas solares e reservatório térmico: circulação forçada por bombeamento;
- Operação do reservatório térmico em relação a caixa d'água de abastecimento: Em desnível afogada;
- Volume do reservatório térmico: 400 l;
- Área total das placas solares: 6,0 m²;
- Tempo de monitoração: 19 meses, de outubro de 2014 a abril de 2016.

4.2.1 Componentes

A seguir, apresenta-se os materiais que compõem o sistema de aquecimento solar:

Placa Solar: é um elemento de conversão da energia solar em energia térmica, aplicado no processo de aquecimento de água. Segue as características técnicas da placa solar utilizada:

- Fabricante: Solis Aquecedor Solar Ltda;
- Modelo: Meu Sol V1.5;
- Dimensão 1,50 m x 1,00 m x 0,065 m;
- Área externa 1,50 m² e área útil 1,465 m²;
- Classificação A e selo PROCEL de economia de energia, conforme PBE;
- Parâmetros de projeto (conforme PBE): $Fr(\tau\alpha)$ 0,741, $FrUl$ 6,681, $K\tau\alpha = 1-b/\cos(\Theta)$ e $b = 0,1065$, $\eta = 59,31\%$, $PMEe = 81,7$ kWh/mês.m²;
- Quantidade placas solares utilizadas: 4 unidades.

A Fig. 4.3 apresenta as placas solares e sua posição de instalação, no telhado da residência.



Figura 4.3 – Placas solares instaladas.

Reservatório Térmico: é responsável pela armazenagem da água quente e conservação da mesma para consumo, conforme perfil dos usuários. Segue as características técnicas do reservatório térmico utilizado:

- Fabricante: Solis Aquecedor Solar Ltda;
- Modelo: Meu Sol 400 BPF;
- Volume: 400 l;
- Dimensões: Diâmetro de 65 cm e comprimento de 170,5 cm;
- Pressão de trabalho: 49,00 kPa;

- Potência da resistência elétrica: 2.750 W;
- Etiquetado no PBE e com selo PROCEL de economia de energia;
- Perda Específica de Energia Mensal (conforme PBE): 0,15 kWh/mês/l;
- Quantidade: 1 unidade.

A Fig. 4.4 apresenta o reservatório térmico e sua condição de instalação, sob o telhado da residência.



Figura 4.4 – Reservatório térmico instalado.

Eletrobomba: é responsável por promover a circulação da água entre as placas solares e o reservatório térmico. Segue suas características técnicas:

- Fabricante: Texius Industria e Comércio de Eletrobombas Ltda.
- Modelo: TBHX
- Potência: 100 W;
- Alimentação elétrica: 127V;
- Pressão máxima: 6,5 mca;
- Vazão máxima: 45 l/min;
- Quantidade: 1 unidade;

A Fig. 4.5 apresenta a eletrobomba em sua condição de instalação, sob o telhado da residência e ao lado do reservatório térmico.



Figura 4.5 – Eletrobomba.

Tubulação Hidráulica: Os tubos e conexões entre os componentes do sistema de aquecimento solar, conforme Fig. 4.6, tem as seguintes características:

- Tipo: cobre classe E;
- Diâmetro nominal: 15mm e 22mm.



Figura 4.6 -Tubulação hidráulica. Fonte: Eluma/Paranapanema.

Controlador Diferencial de Temperatura: tem a função de automatizar o acionamento da eletrobomba, por diferença de temperatura entre as placas solares e reservatório térmico. Para isto, são instalados os sensores de temperatura S1, na saída das placas solares, e S2, na saída do reservatório térmico. Sempre que a diferença de temperatura entre S1 e S2 for maior que 5°C, a eletrobomba é acionada e quando a diferença de temperatura entre S1 e S2 for menor ou igual a 2°C, a eletrobomba é desligada, conforme Fig. 4.7. Segue as características técnicas do controlador diferencial de temperatura utilizado:

- Fabricante: Full Gauge Controls Ltda;
- Modelo: Energysol Plus
- Alimentação elétrica: 90 a 264 Vac (50/60Hz);
- Entrada: até 4 sensores de temperatura S1, S2, S3 e S4;

- Tipo de sensor de temperatura: NTC – Negative Temperature Coeficiente,
- Temperatura de controle: S1,S3 e S4 entre -50°C a 200°C e S2 entre -50°C a 105°C ;
- Resolução $0,1^{\circ}\text{C}$ entre -10°C a 100°C e restante da faixa de 1°C .
- Saída: até 4 relés de saída 5 A / 240 Vac / 1/8 HP;
- Comunicação serial RS485 para aquisição de dados.



⬇️ e ⬆️ : Estas teclas são utilizadas para navegar entre os menus e funções do controlador. Quando o usuário está efetuando o ajuste de uma função, a tecla ⬇️ diminui e ⬆️ aumenta o valor da função.

⌂ : Se o usuário estiver visualizando a tela principal e pressionar esta tecla, serão exibidas no display as funções de acesso facilitado. Quando está sendo visualizado um menu ou sub-menu, o controlador volta à tela principal ou um menu acima.

⏹️ : É utilizada para entrar em um menu ou função. Ao ajustar uma função esta tecla serve para confirmar um novo valor.

Figura 4.7 – Controlador diferencial de temperatura. Fonte: Full Gauge Controls Ltda.

A Fig. 4.8 apresenta o esquema da ligação elétrica do controlador diferencial de temperatura com a rede elétrica, cargas de acionamento e sensores de temperatura, respectivamente.

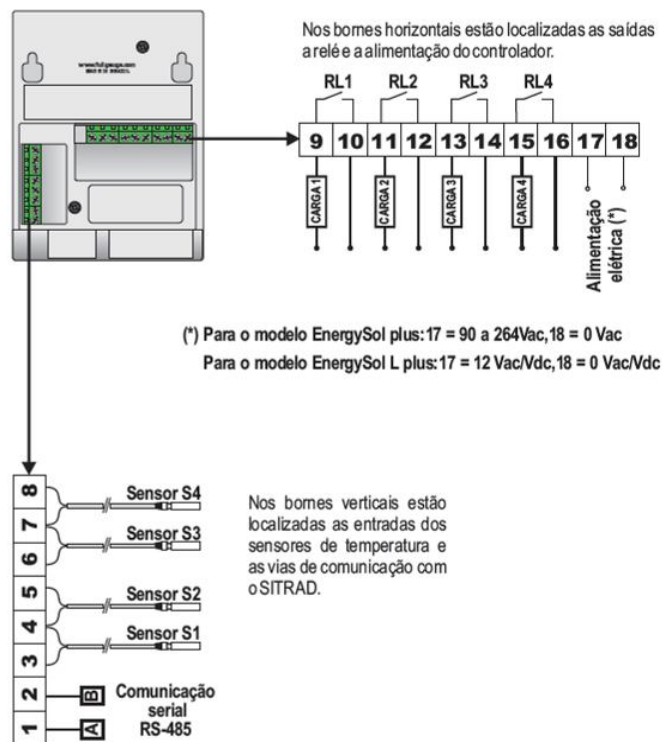


Figura 4.8 – Esquema de ligação elétrica. Fonte: Full Gauge Controls Ltda.

4.2.2 Instrumentos de Medição

Além dos materiais que compõe o sistema de aquecimento solar, apresenta-se a seguir a instrumentação necessária para medição dos dados.

As características técnicas dos sensores de temperaturas encontram-se disponíveis no item anterior, *Controlador Diferencial de Temperatura*. Conforme Fig. 4.9, os mesmos foram distribuídos da seguinte forma:

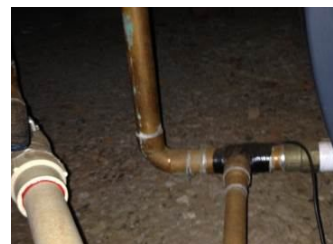
- Sensor 1: Posicionado na saída das placas solares
- Sensor 2: Posicionado na entrada das placas solares
- Sensor 3: Posicionado na temperatura ambiente.
- Sensor 4: Entrada de água fria.
- Sensor 5: Consumo de água quente.



(a) Sensor temperatura



(b) Sensor 1



(c) Sensor 2



(d) Sensor 3



(e) Sensor 4



(f) Sensor 5

Figura 4.9 – Posição de fixação dos sensores de temperaturas no sistema.

Medidor de Vazão Volumétrica na Placas Solares: Tem a função de medir a vazão volumétrica que flui nas placas solares a cada intervalo de tempo de 30 segundos, a partir do instante em que a eletrobomba de circulação é acionada. Segue características técnicas:

- Fabricante: Yifa the Plastics Ltd
- Modelo: YF - 21
- Tipo: Digital com sensor de efeito Hall;
- Alimentação elétrica: 5 a 24Vcc;
- Faixa de medida de vazão: 1 a 30 l/min.
- Temperatura do líquido: Até 120°C;
- Pressão de trabalho: Até 2,0 Mpa.

A Fig. 4.9 apresenta o medidor de vazão em condição de instalação.

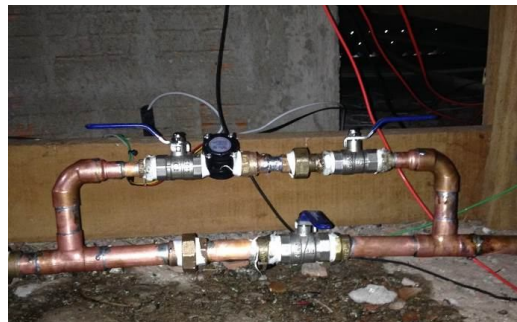


Figura 4.10 – Medidor de vazão volumétrica das placas solares.

Medidor de Vazão Volumétrica do Consumo Água Quente: Tem a função de medir a vazão volumétrica que flui no consumo de água quente a cada intervalo de tempo de 30 segundos. Segue características técnicas:

- Fabricante: GWF MessSysteme AG;
- Modelo: Unico
- Tipo: Digital com sensor de efeito Hall;
- Alimentação elétrica: 42 Vcc/ac;
- Faixa de medida de vazão: 0,2 a 20 l/min;
- Temperatura do líquido: Até 120°C;
- Pressão de trabalho: Até 157 Kpa.

A Fig. 4.10 apresenta o medidor de vazão em condição de instalação.

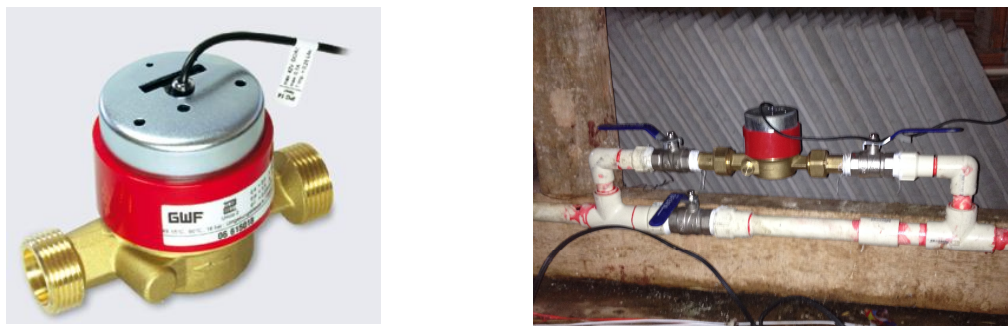


Figura 4.11 – Medidor de vazão volumétrica para consumo água quente.

Piranômetro: Tem a função de medir a irradiação global incidente no plano das placas solares. É importante sua posição na mesma inclinação das placas. Segue as características técnicas:

- Fabricante: Fascitec Controladores Eletrônicos Ltda.
- Modelo: SIR;
- Tipo do sensor: Fotodiodo de silício, espectro de 400 a 1100 nanômetros;
- Alimentação: 0 a 2,5V;

O transdutor do sensor, que converte a irradiação incidente em corrente elétrica, é um fotodiodo de silício com resposta de amplo espectro. O invólucro protege o sensor da irradiação e provê circulação de ar para o resfriamento do mesmo, minimizando a interferência térmica na medição. Além disso, o invólucro também protege contra acúmulo de água da chuva. Um amplificador interno converte o sinal do fotodiodo em sinal de 0 a 2,5 V de tensão contínua, conforme Fig. 4.12.



Figura 4.12 – Piranômetro em condição de instalação.

4.2.3 Aquisição de Dados

Para aquisição dos dados, foi utilizado um conversor conectado a um computador através de conexão USB. A interface entre ambos foi possível através do protocolo de comunicação RS-485. Utilizou-se para armazenamento dos dados um computador. Os instrumentos usados na aquisição de dados foram:

Conversor de Dados: tem a função de permitir comunicação entre os instrumentos de controle Full Gauge, com comunicação serial RS-485, e o já referido computador através de uma porta USB, conforme Fig. 4.13. Segue características técnicas:

- Fabricante: Full Gauge Controls Ltda;
- Modelo: CONV 32;
- Alimentação: Através de porta USB;
- Conexões: Até 32 instrumentos, sem a necessidade de terminação.



Figura 4.13 – Conversor de dados.

Expansor de Dados: é um módulo expensor de entradas e saídas desenvolvido para operação em conjunto com o software de gerenciamento de instalações. Com o uso do expensor, é possível receber os sinais dos sensores de irradiação solar, vazão volumétrica nas placas solares e do consumo de água quente através nas entradas analógicas de 0 a 5 Vcc e transmitir a informação para o conversor de dados, CONV 32, conforme ilustra a Fig. 4.14 e Fig. 4.15. Segue as características técnicas:

- Fabricante: Full Gauge Controls Ltda;
- Modelo: MOD 64;
- Alimentação: 115/230Vac $\pm 10\%$ (50/60Hz);
- Dimensões: 115 x 90 x 40mm;
- Temperatura de operação: 0 a 50°C;
- Umidade de operação: 10 a 90% UR(sem condensação);
- Indicação:

4 Led's de indicação das entradas digitais

4 Led's de indicação das saídas

1 Led de indicação de POWER

- Entradas:

IN 1 - Entrada de tensão isolada 115/230Vac $\pm 10\%$

IN 2 - Entrada de tensão isolada 115/230Vac $\pm 10\%$

DIG1 - Entrada digital não isolada (contato seco)

DIG2 - Entrada digital não isolada (contato seco)

AN1 - Entrada analógica não isolada (0 a 5Vdc)

AN2 - Entrada analógica não isolada (0 a 5Vdc)

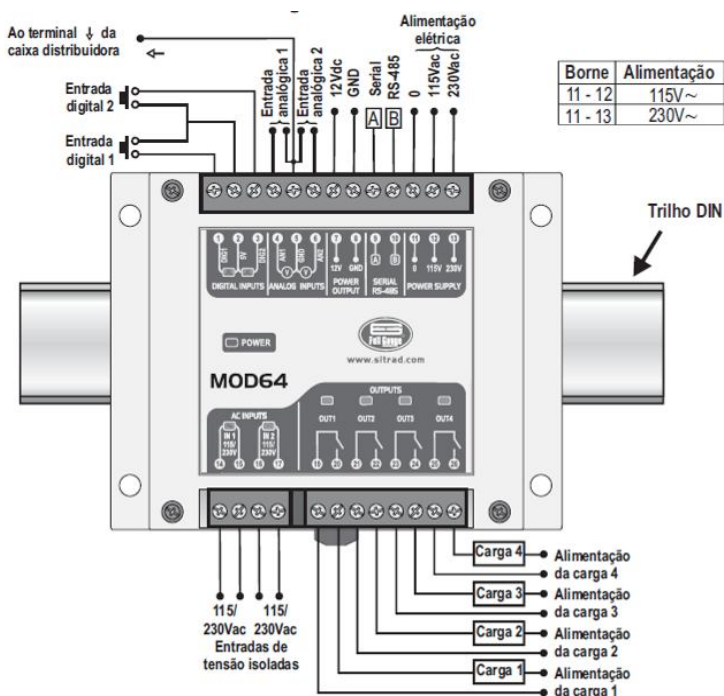


Figura 4.14 – Expansor de dados. Fonte: Full Gauge Controls Ltda.

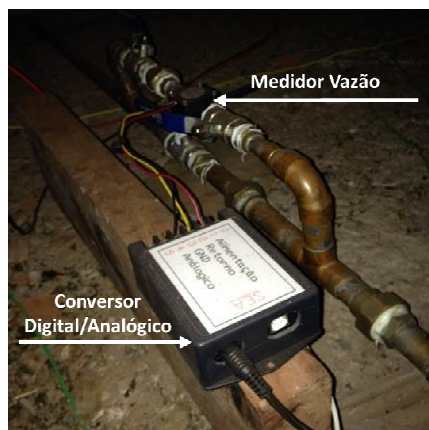


Figura 4.15 – Expandores de dados em condições de uso.

Conversor Digital/Analógico: usado para converter os sinais digitais dos medidores de vazão volumétrica e consumo de água em sinal analógico, de 0 a 5 V. Para a construção dos mesmos foram utilizadas placas controladoras com as seguintes características:

- Fabricante: Arduino;
- Modelo: V2.1;
- Tipo: Plataforma aberta.
- Alimentação: 5 Vcc;

A conversão do sinal foi necessária visto que as portas digitais do expensor de dados, MOD 64, não são dotadas de contador de pulso (apenas contador de tempo). Com o sinal condicionado, foi possível fazer a aquisição dos dados através das portas de entrada analógicas do MOD 64, conforme Fig. 4.16.



(a) Conversor de sinal placas solares



(b) Conversor de sinal entrada de água fria no reservatório térmico.

Figura 4.16 – Conversores digital/analógico em condições de uso.

Programa de Gerenciamento: Tem a função de fazer a interface homem – máquina no processo de monitoração e aquisição dos dados, através do computador, conforme Fig. 4.17. Segue características técnicas:

- Fabricante: Full Gauge Controls Ltda;
- Modelo: SITRAD;
- Tipo: Plataforma de comunicação fechada e download gratuito;
- Frequência de aquisição de dados: A cada 30 segundos.



Figura 4.17 – Software de gerenciamento.

Computador: Utilizado para aquisição dos dados experimentais monitorados. A seguir, suas características técnicas:

- Fabricante: Sony Brasil Ltda.
- Modelo: Vaio
- Processador: Core Duo Intel Core I3 380M, 2,53 GHz, 4 Gb DDR3, 1.333MHz
- Memória: Ram 8 Gb e HD 640Gb;

A Fig. 4.18 ilustra o esquema de conexão elétrica e interface entre toda instrumentação apresentada para medição e aquisição dos dados.

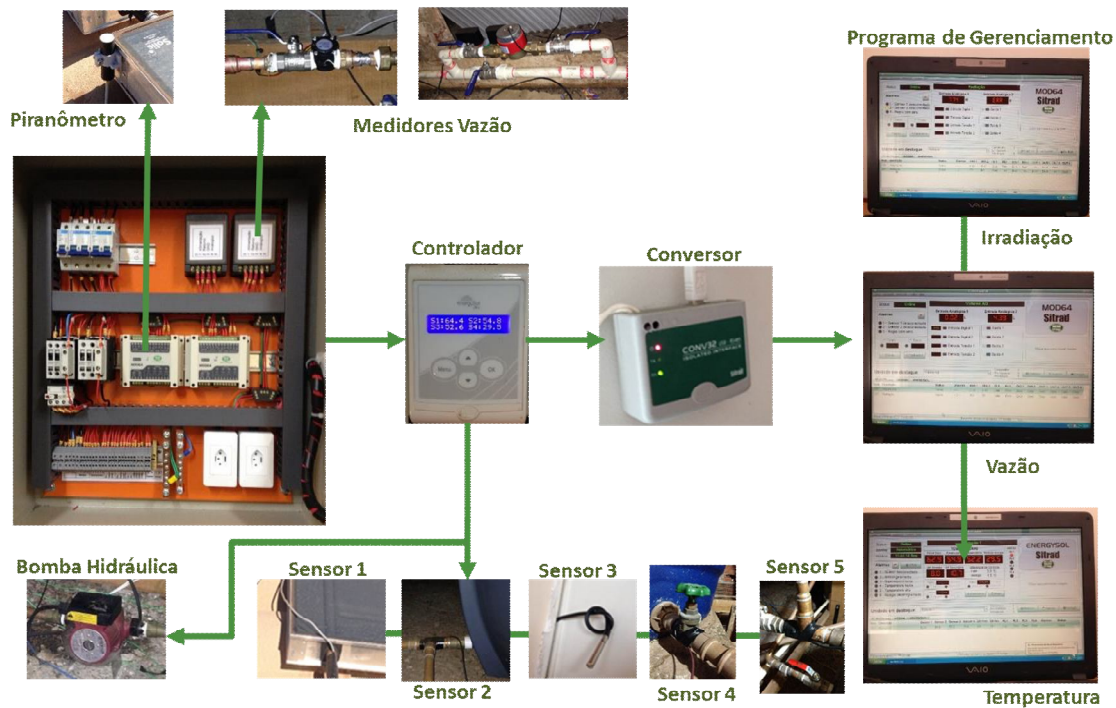


Figura 4.18 – Esquema de conexão elétrica e interface entre instrumentação.

Medidor de Consumo Energia Elétrica: o consumo de energia elétrica é medido diretamente do quadro de comando. Este instrumento não permitiu monitoração remota, portanto foram necessários registros mensais manualmente, conforme Fig. 4.19. Segue características técnicas:

- Fabricante: Sibratec – CCA Industria e Comércio de Materiais Elétricos Ltda.
- Modelo: DDS-1Y 18L;
- Alimentação: 230V / 50 ou 60Hz / 5 a 50A;

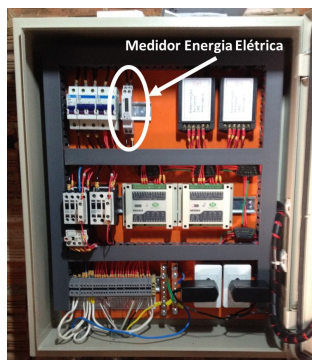


Figura 4.19 – Medidor de energia elétrica.

4.3. Procedimentos Experimentais

A seguir, é detalhado o procedimento para cálculo da taxa de calor útil nas placas solares a cada instante de tempo. A somatória no tempo permitiu o cálculo da captação mensal de energia. Neste caso, os dados experimentais monitorados somente foram considerados quando havia vazão volumétrica nas placas solares maior que zero. O tratamento dos dados foi organizado por média horária mensal e, posteriormente, por média mensal ao longo do ano.

No âmbito do PBE/INMETRO, e conforme ANEXO C, também é comum o uso dos termos Produção Mensal de Energia (*PME*), expresso em kWh/mês, e Produção Mensal de Energia específica (*PMEe*), expresso em kWh/mês.m², cuja aplicação está na facilidade para comparar diferentes produtos, independentes de suas dimensões. Em função disto, estes termos foram adotados neste trabalho de pesquisa.

4.3.1 Eficiência Térmica

A eficiência térmica das placas solares pôde ser calculada a partir dos dados experimentais e teóricos. Para isto foram utilizados dois métodos distintos, ou seja:

- Método da Primeira Lei da Termodinâmica: aplicado aos dados experimentais a serem monitorados e registrados, conforme já citado.
- Método de Eficiência Térmica Instantânea ou Método das Perdas: aplicado aos dados teóricos, calculados através dos modelos levantados na literatura.

4.3.1.1 Método da Primeira Lei da Termodinâmica

O método para cálculo da eficiência térmica pela Primeira Lei da Termodinâmica, leva em consideração as equações de conservação de massa e energia para volumes de controle, em que se considera a existência de fluxo de massa, conforme Fig. 4.20. Para os cálculos,

levou-se em consideração as equações D.8, D.9, D.10 e E.11, como apresentado no ANEXO D, ou seja:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_{sp} - T_{ep}) \quad (\text{D.8})$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u (\text{energia pretendida})}{G.A_{ext} (\text{energia disponível})} \quad (\text{D.9})$$

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep})}{G \cdot A_{ext}} \quad (\text{D.10})$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (\text{D.11})$$

Onde;

η : eficiência térmica;

\dot{m} : vazão mássica expressão em kg/s;

c_p : Calor específico da água a pressão constante equivalente a 4,180 KJ/kg.°C;

T_{sp} : Temperatura de saída da água na placa solar, expressa em °C;

T_{ep} : Temperatura de entrada da água na placa solar, expressa em °C;

A_{ext} : Área externa da placa solar, expressa em m²;

G: Taxa de irradiação solar global incidente no plano da placa solar, expressa em W/m².

\dot{Q}_u : taxa de calor útil absorvido pela água, expresso em W.

ρ : densidade da água na temperatura de entrada da placa solar, expressa em kg/ m³;

\dot{V} : vazão volumétrica da água expressa em m³/s.

Importante ressaltar que este método foi adotado exclusivamente na análise experimental, cujas variáveis foram monitoradas, conforme Eq. 4.1.

$$\eta_{Exp} = \frac{\dot{m}.c_p.(T_{sp} - T_{ep})}{G.A_{ext}} \quad (4.1)$$

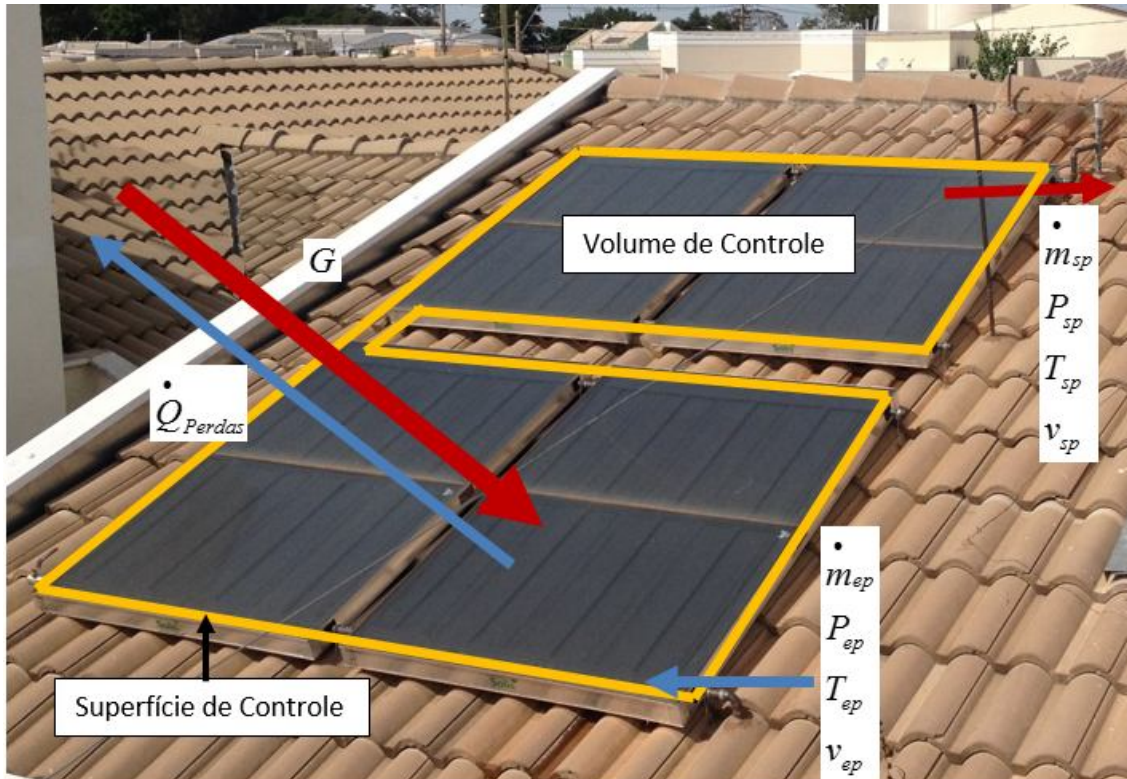


Figura 4.20 – Volume de controle na placa solar.

4.3.1.2 Método de Eficiência Térmica Instantânea ou Método das Perdas

O cálculo do rendimento térmico pela análise da Primeira Lei da Termodinâmica não permite identificar pontos de otimização no projeto das placas solares. Em função disto, faz-se uso do cálculo do rendimento térmico pelo Método de Eficiência Térmica Instantânea ou Método das Perdas que permite determinar, experimentalmente, a equação de rendimento, como apresentado no ANEXO E, ou seja:

$$\eta = \frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \quad (E.8)$$

Onde;

A_u : Área útil da placa solar, em m²;

$F_R \tau \alpha$: Parâmetro adimensional referente aos ganhos térmicos da placa solar;

$F_R U_L$: Parâmetro referente as perdas térmicas da placa solar, W/m² °C;

T_{amb} : Temperatura ambiente, °C.

Importante ressaltar que este método foi adotado exclusivamente na análise teórica, cujas variáveis de entrada são provenientes de banco de dados climatológicos e modelos matemáticos disponíveis na literatura, conforme Eq. 4.2 abaixo. Além disso, foi adicionado à referida equação o fator de correção do ângulo de incidência, conforme ANEXO C.

$$\eta_{Teo} = \frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ K_{\tau\alpha} F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \quad (4.2)$$

4.3.2 Produção Mensal de Energia

A captação de calor útil (energia incidente menos perdas) pela placa solar durante uma hora, equivale ao produto de sua eficiência térmica pela energia incidente no plano da placa neste mesmo período de tempo. Conforme detalhado no ANEXO C, a soma dos valores horários para as “i” horas do dia, com nível satisfatório de radiação solar, fornece a produção diária de energia. Na sequência, se multiplicado por Nd (número de dias do mês), obtém-se a produção mensal de energia, representado pelo termo PME e expresso em kWh/mês, conforme Eq. C.6.

$$PME = \frac{Nd}{1000} \sum_{i=1}^{i=n} \eta \cdot (G \cdot A_{ext}) \quad (C.6)$$

No âmbito do PBE/INMETRO, e conforme ANEXO C, também é comum o uso do termo Produção Mensal de Energia específica, $PMEe$, conforme Eq. 4.3, expressa em kWh/mês.m².

$$PMEe = \frac{Nd}{1000} \sum_{i=1}^{i=n} \eta \cdot G \quad (4.3)$$

Para o cálculo da produção mensal de energia específica experimental, $PMEe_{Exp}$, o índice i variou de 1 a 12 (dados experimentais válidos foram monitorados das 7 às 19 horas), conforme Eq. 4.4. Todas as variáveis de entrada necessárias ao cálculo da $PMEe_{Exp}$, são experimentais e a eficiência térmica foi calculada pelo Método da Primeira Lei da Termodinâmica.

$$PMEe_{Exp} = \frac{Nd}{1000} \sum_{i=1}^{12} \eta \cdot G \quad (4.4)$$

Para o cálculo da produção mensal de energia teórica, $PMEe_{Teo}$, o índice i variou de 1 a 9 (dados teóricos são válidos das 8 às 17 horas), conforme detalhado no ANEXO C e Eq. 4.5. A eficiência térmica foi calculada pelo Método de Eficiência Térmica Instantânea ou Método das Perdas.

$$PMEe_{Teo} = \frac{Nd}{1000} \sum_{i=1}^9 \eta \cdot I_T \quad (4.5)$$

O procedimento de cálculo da $PMEe_{Teo}$ depende de variáveis de entrada teóricas, extraídas da literatura. Portanto, segue abaixo os procedimentos para extração das mesmas:

Passo 1 – Determinar a irradiação solar incidente no plano das placas solares teórica, I_T , em média horária para o mês em estudo, conforme ANEXO B. Para isto, os modelos matemáticos são alimentados com as seguintes informações:

- Cidade de referência: Araçatuba SP;
- Latitude (ϕ): -21,21°;
- Longitude (L): -50,45°;
- Altitude (Z): 409,11m.
- N° de horas insolação (n): Extraídos das Normais Climatológicas do DNMET (1992), para a cidade referência de Araçatuba SP.

Passo 2 – Determinar a temperatura ambiente teórica, T_{ambTeo} , em média horária. Adotar modelo teórico recomendado pela ASHRAE, baseado nas temperaturas estatísticas máximas (T_{max}) e mínima (T_{min}) para o mês em estudo. Considerando que a temperatura é máxima às 14 horas. A equação proposta resulta em:

$$T_{ambTeo} = T_{max} - \frac{\Delta T}{2} + \frac{\Delta T}{2} \cos \left[\frac{15 \cdot (HS - 14) \cdot \pi}{180} \right] \quad (4.6)$$

Onde:

$$\Delta T = T_{max} - T_{min}$$

HS: Hora solar

Os dados estatísticos de temperatura máxima e temperatura mínima, média mensal, para a cidade referência de Araçatuba SP, foram extraídas também das Normais Climatológicas do INMET.

Passo 3 – Determinar o ângulo de incidência da irradiação solar direta para a hora média do período de operação das placas solares. Procede conforme ANEXO A e Eq. A.3. Adotar o intervalo entre 8 e 17 horas.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \beta - \text{sen} \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \varpi + \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varpi + \cos \delta \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} \varpi \end{aligned} \quad (A.3)$$

Passo 4 – Determinar temperaturas de entrada teórica da água nas placas solares, T_{epTeo} . Adotar as mesmas arbitradas no Regulamento Específico para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - INMETRO / PBE, conforme ANEXO C e Tab. 4-1.

Tabela 4-1 – Temperatura de entrada das placas solares teórica.

Hora	07:01 a 08:00	08:01 a 09:00	09:01 a 10:00	10:01 a 11:00	11:01 a 12:00	12:01 a 13:00	13:01 a 14:00	14:01 a 15:00	15:01 a 16:00	16:01 a 17:00
T_{epTeo}	30°C	32°C	34°C	36°C	38°C	40°C	40°C	40°C	38°C	36°C

Passo 5 – Levantar os parâmetros de projeto da placa solar: $F_R \tau \alpha$ (ganhos térmicos), $F_R U_L$ (perdas térmicas), $K \tau \alpha$ (fator de correção do ângulo de incidência), área externa e área

útil. Adotar os parâmetros da placa solar utilizada no sistema de aquecimento solar monitorado, conforme apresentado anteriormente.

- $Fr(\tau\alpha)$: 0,741;
- $FrUL$: 6,681 W/m² °C;
- $K\tau\alpha = 1-b/\cos(\Theta)$ e $b = 0,1065$;
- Área externa: 1,50 m²;
- Área útil: 1,465 m².

Importante ressaltar que, conforme ANEXO C, os parâmetros da placa solar são extraídos da curva de eficiência térmica instantânea, cuja vazão mássica considerada é de 0,02 kg/s por m² de placa solar, conforme ANSI/ASHRAE 93 2003. As boas práticas de projeto, em sistemas de aquecimento solar, têm como prioridade proporcionar à placa solar condições de operação o mais próximo possível das condições de teste. Diante disto, o conceito de associação das placas solares em paralelo ou série tem impacto direto no cálculo vazão mássica de projeto, conforme Fig. 4.20. Entende-se por bateria um agrupamento de placas solares. Vale reforçar, conforme já apresentado anteriormente, que a placa solar em estudo tem área de 1,5 m².

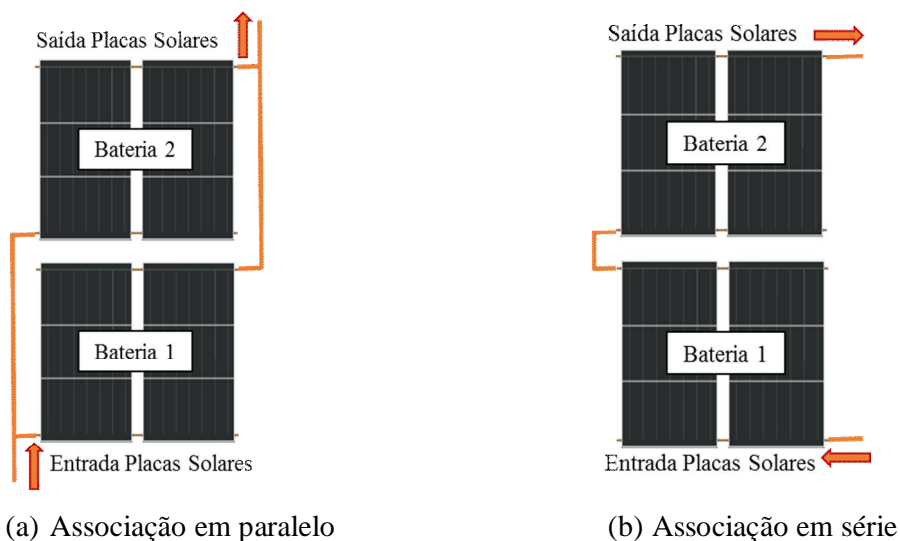


Figura 4.21 – Associação de placas solares.

Para cálculo da vazão mássica de projeto das placas solares, tem-se a seguinte equação:

$$\dot{m}_p = Np \cdot (Nb + 1) \cdot A_{ext} \cdot \dot{m}_{teste} \quad (4.7)$$

Onde:

\dot{m}_p : vazão mássica de projeto das placas solares, kg/s;

Np : número de placas solares por bateria;

Nb : número de associações de baterias em paralelo;

A_{ext} : área externa da placa solar, m²;

\dot{m}_{teste} : vazão mássica de teste, igual 0,02 kg/s.m²;

Para as placas solares associadas em paralelo, conforme Fig. 4.21 (a), a vazão mássica de projeto deve ser compatível com a soma da área de todas as placas solares agrupadas nas baterias 1 e 2, respectivamente. Desta forma, o ganho de temperatura entre a saída e entrada de todas as placas solares serão iguais. Neste caso, aplicando-se a Eq. 4.7, obtém-se:

$$\dot{m}_p = 0,12 \text{ kg / s}$$

Para as placas solares associadas em série, conforme Fig. 4.21 (b), a vazão mássica de projeto deve ser compatível apenas com a área das placas solares da bateria 1, que por sua vez será igual à da bateria 2. Desta forma, o ganho de temperatura entre a saída das placas solares da bateria 2 e entrada das placas solares da bateria 1 será maior, quando comparada à associação em paralelo. Neste caso, também aplicando-se a Eq. 4.7 , obtém-se:

$$\dot{m}_p = 0,06 \text{ kg / s}$$

Para o sistema de aquecimento solar monitorado, objeto deste trabalho de pesquisa, as 4 placas solares estão agrupadas em 2 baterias de 2 placas e associadas em série. Portanto, a vazão mássica de projeto das placas solares é equivalente ao proposto na Fig. 4.21(b) e, portanto, igual a 0,06 kg/s.

Para calcular da vazão volumétrica, conforme ANEXO C e Eq. D.11, tem-se:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (\text{D.11})$$

Considerando-se a massa específica da água em circulação nas placas solares como $990,10 \text{ kg/m}^3$, tem-se a vazão volumétrica teórica (\dot{V}_{psTeo}) igual a $6,06 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Para facilitar a análise da vazão volumétrica teórica, em comparação com a vazão volumétrica experimental, optou-se por apresentá-las na unidade mais comumente praticada pelo mercado, ou seja, igual $3,63 \text{ l/min}$.

4.3.3 Demanda Mensal de Energia

A demanda mensal de energia, representada pelo termo DME , conforme Eq. 4.8, e expressa em kWh/mês, tem como significado físico a necessidade de energia térmica compatível ao consumo de água quente, que se multiplicado por Nd (número de dias do mês), obtém-se o seguinte valor mensal:

$$DME = Nd \cdot \rho \cdot V \cdot c_p (T_{aq} - T_{af}) \quad (4.8)$$

Onde:

Nd : número de dias do mês em estudo;

ρ : massa específica, em kg/m^3 ;

V_{aq} : consumo diário de água quente, em m^3 ;

c_p : calor específico a pressão constante, $\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$;

T_{aq} : Temperatura de água quente, em $^\circ\text{C}$;

T_{af} : Temperatura de água fria, em $^\circ\text{C}$.

A demanda mensal de energia, DME , foi calculada para o consumo real de água quente e comparada à produção mensal de energia experimental, PME_{Exp} , e ao consumo mensal de energia elétrica, CEE .

4.3.4. Cálculo de Incerteza

A seguir, apresenta-se as incertezas da instrumentação utilizada no experimento:

- Temperatura (T): $\pm 1,5^\circ\text{C}$ para faixa de -50°C a 105°C (conforme fabricante);
- Vazão volumétrica placa solar (\dot{V}_{ps}): $\pm 0,13$ l/min, conforme calibração no ANEXO G;
- Consumo água quente (V_{aq}): $\pm 0,13$ l, conforme calibração no ANEXO G;
- Radiação (G): $\pm 8,31$ W/m², conforme calibração no ANEXO G.

O desenvolvimento dos cálculos de propagação das incertezas está detalhado no ANEXO F. A seguir, são apresentadas as equações finais e suas respectivas variáveis:

Vazão volumétrica da placa solar experimental: \dot{V}_{psExp}

$$w_{\dot{V}_{psExp}} = 2 \cdot w_{V_{psExp}} \quad (\text{F.3})$$

Taxa de calor útil absorvido pela água na placa solar: \dot{Q}_u

$$w_{\dot{Q}_u} = \sqrt{\left[\rho \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep}) \cdot w_{\dot{V}_{col}} \right]^2 + \left(\dot{V}_{col} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{sp}} \right)^2 + \left(-\dot{V}_{col} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{ep}} \right)^2} \quad (\text{F.4})$$

Calor útil absorvido pela água na placa solar: Q_u

$$w_{Q_u} = 30 \cdot w_{\dot{Q}_u} \quad (\text{F.5})$$

Eficiência térmica pelo Método da Primeira Lei da Termodinâmica: η

$$w_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{1}{A_{ext} \cdot G} \cdot w_{\dot{Q}_u} \right)^2 + \left(-\frac{\dot{Q}_u}{A_{ext} \cdot G^2} \cdot w_G \right)^2} \quad (\text{F.6})$$

Eficiência térmica pelo Método de Eficiência Térmica Instantânea (Método das Perdas): η

$$w_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G^2} \cdot w_G\right)^2 + \left(-\frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L}{G} \cdot w_{T_{ep}}\right)^2 + \left(\frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L}{G} \cdot w_{T_{amb}}\right)^2} \quad (F.7)$$

Taxa de calor útil produzida na placa solar pelo Método das Perdas: \dot{Q}_u

$$w_{\dot{Q}_u} = \sqrt{\left(A_{ext} \cdot \eta \cdot 3,6 \cdot w_G\right)^2 + \left(G \cdot A_{ext} \cdot 3,6 \cdot w_{\eta}\right)^2} \quad (F.8)$$

Energia térmica consumida: DME

$$w_{DME} = \sqrt{\left[\rho \cdot c_p \cdot (T_{aq} - T_{af}) \cdot w_{V_{aq}}\right]^2 + \left(V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{af}}\right)^2 + \left(-V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{af}}\right)^2} \quad (F.9)$$

Os materiais e metodologia do trabalho proposto, para monitorar o sistema de aquecimento solar residencial, aquisição e tratamento de dados, cálculos experimentais e teóricos, foram expostos. A seguir, é apresentado os resultados, análises comparativas entre os métodos e oportunidades de melhorias, em nível de projeto, dimensionamento e instalação.

CAPITULO 5 - RESULTADOS

De todos os dados monitorados, foram considerados inválidos aqueles obtidos nos dias em que ocorreram perda total ou parcial de dados por queda de energia elétrica, problemas técnicos na instrumentação ou algum tipo de ação externa que comprometesse a confiabilidade da informação. Diante disto, foi possível aproveitar 12 meses de dados válidos, conforme Tab. 5-1 abaixo.

Tabela 5-1 – Meses válidos.

Meses	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Foram tratados sistematicamente os dados de todos os dias válidos dos 12 meses de monitoração. Os resultados estão apresentados pela média das variáveis medidas em cada intervalo de uma hora, entre as 7:00hs e 19:00hs de cada dia. Assim, a partir das médias diárias, calculou-se a média mensal das variáveis para os mesmos intervalos horários dos dias. Por uma questão de praticidade, adotou-se como referência os 4 meses de mudança de estação climática para apresentação dos resultados, ou seja:

- Março: mês de equinócio de outono e início em 21/03;
- Junho: mês de solstício de inverno e início em 21/06;
- Setembro: mês de equinócio de primavera e início em 21/09;
- Dezembro: mês de solstício de verão e início em 21/12.

Além disso, os resultados apresentados estão organizados por variável a ser analisada em função do tempo, conforme a seguir:

- Temperaturas;
- Irradiação Solar;
- Vazão Volumétrica;
- Eficiência Térmica;
- Produção Mensal de Energia.

- Demanda Mensal de Energia

Os resultados também estão apresentados em média mensal ao longo do ano contemplando os 12 meses de monitoração. Neste caso são acrescentados os seguintes resultados:

- Tempo de Funcionamento da Bomba Hidráulica;
- Consumo Diário de Água Quente;
- Demanda de Energia Térmica;
- Consumo Mensal de Energia Elétrica;

Importante ressaltar que todo instrumento de medição apresentado passou pelo processo de calibração e seus resultados são apresentados no ANEXO G deste trabalho.

5.1 Temperaturas

As Figs. 5.1 a 5.3 apresentam os perfis das médias das temperaturas experimentais mensais (para o mesmo intervalo de tempo), na entrada das placas solares ($T_{ep\ Exp}$), saída das placas solares ($T_{sp\ Exp}$) e temperaturas ambiente ($T_{amb\ Exp}$). As referidas medidas foram realizadas em cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 7:00hs às 19:00hs de cada dia, para os 4 meses de mudança de estação climática. Além disso, na Fig. 5.1 é acrescentado o perfil das temperaturas teóricas na entrada das placas solares ($T_{ep\ Teo}$), conforme Regulamento Específico para Uso da ENCE (2007), no ANEXO C.

Observa-se nas referidas figuras que os comportamentos dos perfis das médias das temperaturas mensais se repetem, ou seja, junho de 2016 apresentam os menores níveis de temperaturas, como era de se esperar, por se tratar da estação climática de inverno. Os perfis referentes a março de 2015 (estação climática outono) e setembro de 2016 (estação climática primavera) apresentam níveis de temperaturas muito próximos um do outro, sendo os maiores níveis de temperatura de toda análise. Por outro lado, os perfis de dezembro de 2016 (estação climática verão) apresentam níveis de temperaturas intermediários. Nota-se também que, na Fig. 5.1, o perfil da $T_{ep\ Teo}$, referência está adotada pelo PBE no cálculo da produção mensal de

energia, está muito abaixo dos perfis da mesma variável para todos os 4 meses de referência. Vale reforçar que T_{epTeo} é extensivo para o Brasil e T_{epExp} é referente ao microclima da cidade de Birigui SP. Além disso, o ponto de leitura da temperatura e a entrada das placas solares estão distantes em aproximadamente 1,5 m, o que também pode influenciar na leitura. Nota-se a ausência de pontos experimentais para T_{epExp} no primeiro intervalo horário em Mar/16, Set/15 e Dez/15. Isto se deve ao fato da bomba de circulação, nas placas solares, não entrarem em funcionamento no respectivo horário em função da baixa incidência de irradiação solar e, por consequência, baixa temperatura nas placas solares. O comportamento da T_{epExp} , para o Jun/15, nos 2 últimos horários, se deve ao fato da bomba de circulação desligar e em função da energia térmica residual ainda concentrada nas placas solares, voltar a ligar, mesmo com baixa incidência de irradiação solar.

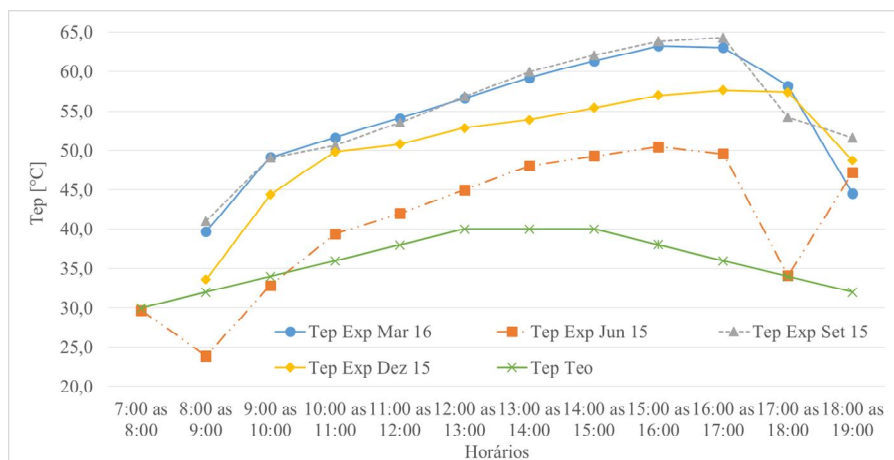


Figura 5.1 – Temperaturas experimentais e teóricas na entrada nas placas solares.

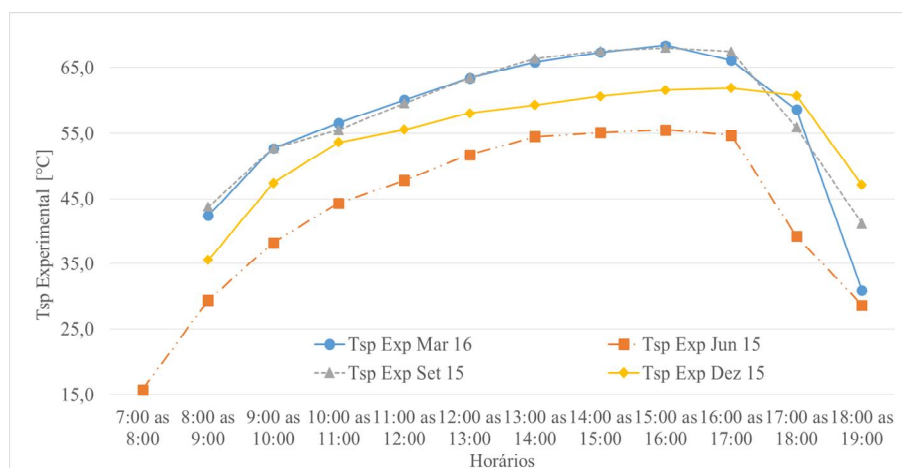


Figura 5.2 - Temperaturas experimentais na saída das placas solares.

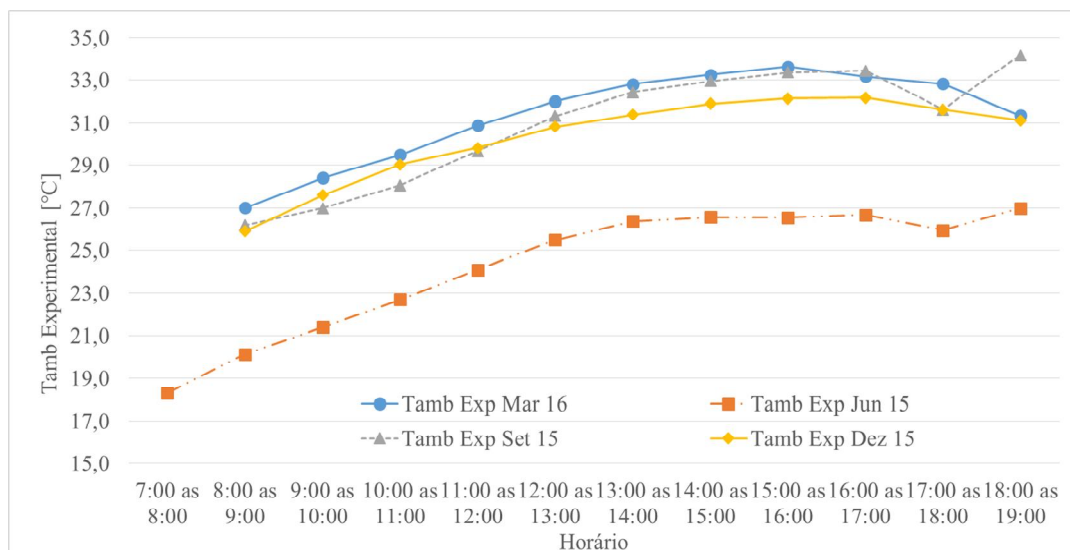


Figura 5.3 – Temperaturas experimentais ambiente.

A Fig. 5.4, apresenta os perfis das médias das temperaturas teóricas mensais ambiente (T_{ambTeo}) calculadas a partir dos dados estatísticos de temperaturas máximas (T_{max}) e mínima (T_{min}), para cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 7:00hs às 19:00hs de cada dia, para os 4 meses de mudança de estação climática. Nota-se que há coerência na referida figura, quando comparado aos perfis de T_{ambExp} , na Fig. 5.3, sobretudo no período da manhã.

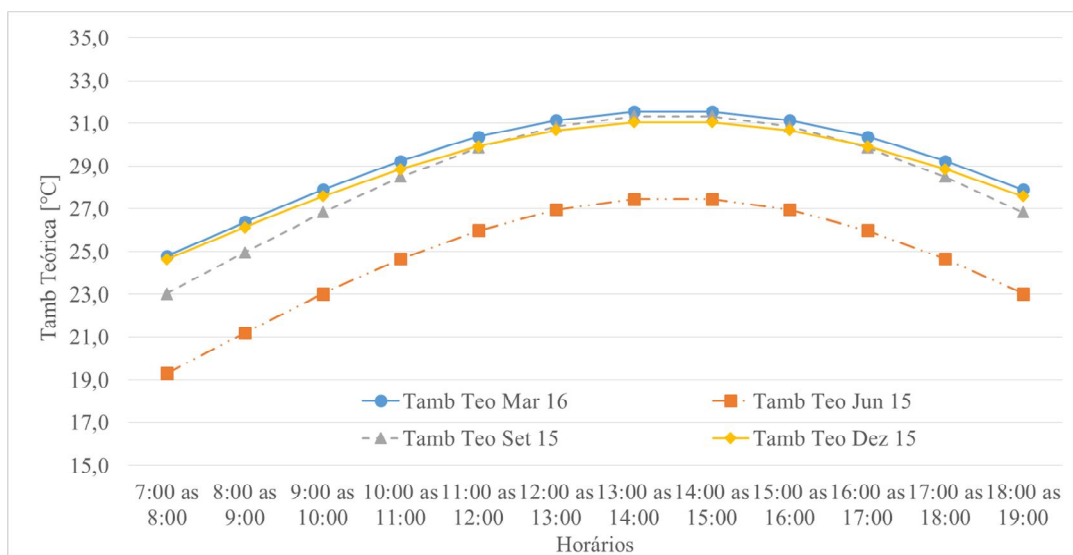


Figura 5.4 – Temperaturas teóricas ambiente.

As Figs. de 5.5 a 5.8, apresentam uma comparação entre os perfis das médias das temperaturas mensais experimentais ambiente (T_{ambExp}) e temperaturas teóricas ambiente (T_{ambTeo}), respectivamente. Nota-se com mais clareza que nas referidas figuras há coerência entre os perfis de temperaturas, sobretudo no período da manhã. Em todas as figuras, as médias das temperaturas se distanciam no período da tarde, sendo que as T_{ambExp} se mantem mais altas desde as 12:00hs até o final do período de monitoração. A única exceção encontra-se na Fig. 5.6, que representa os perfis do mês de junho de 2016, onde há registro de dados de T_{ambExp} a partir das 7:00hs e, apesar de também finalizar o período de monitoração com níveis superiores à T_{ambTeo} , esta observação fica evidente a partir das 16:00hs.

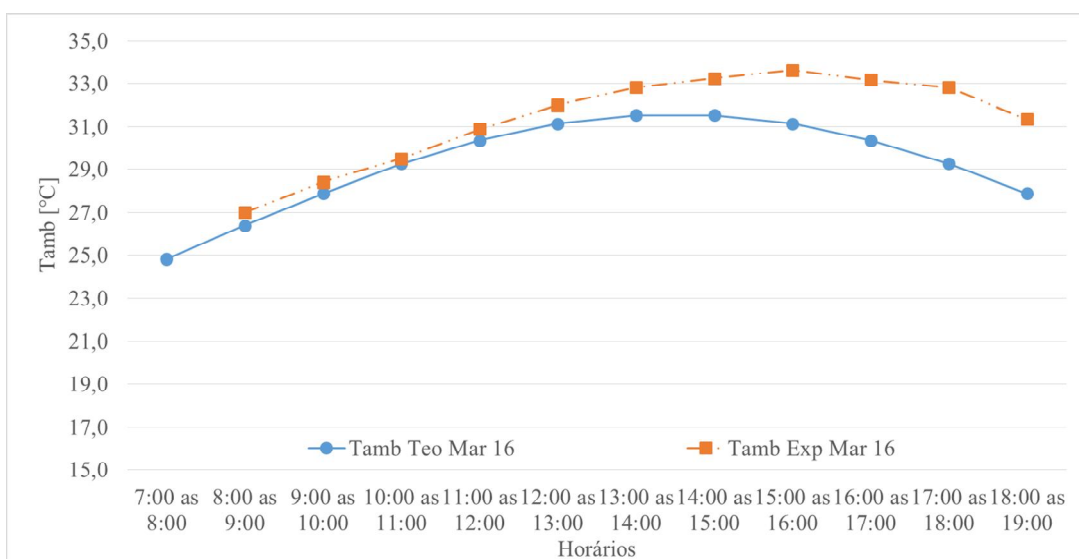


Figura 5.5 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, março de 2016.

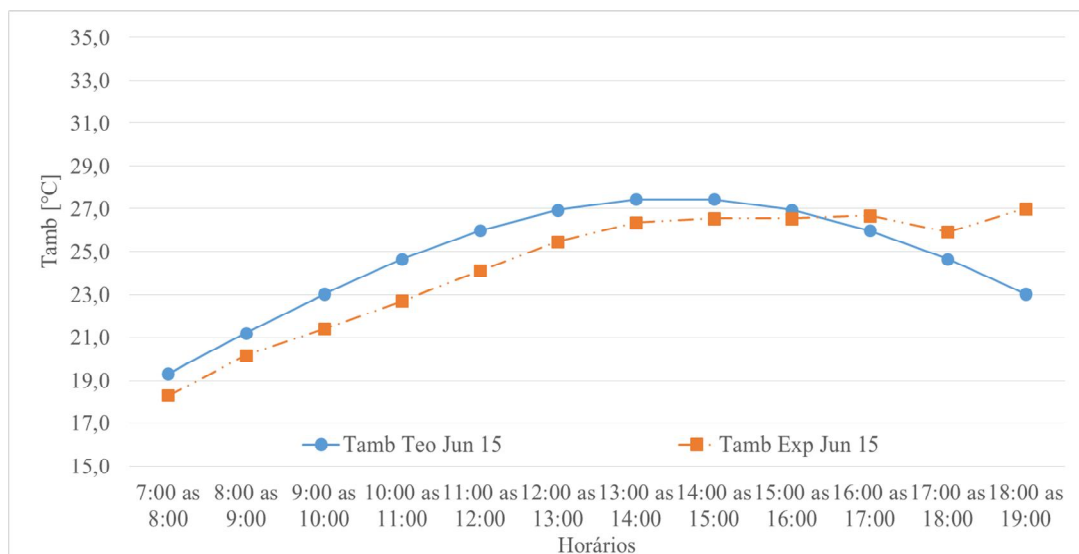


Figura 5.6 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, junho de 2015.

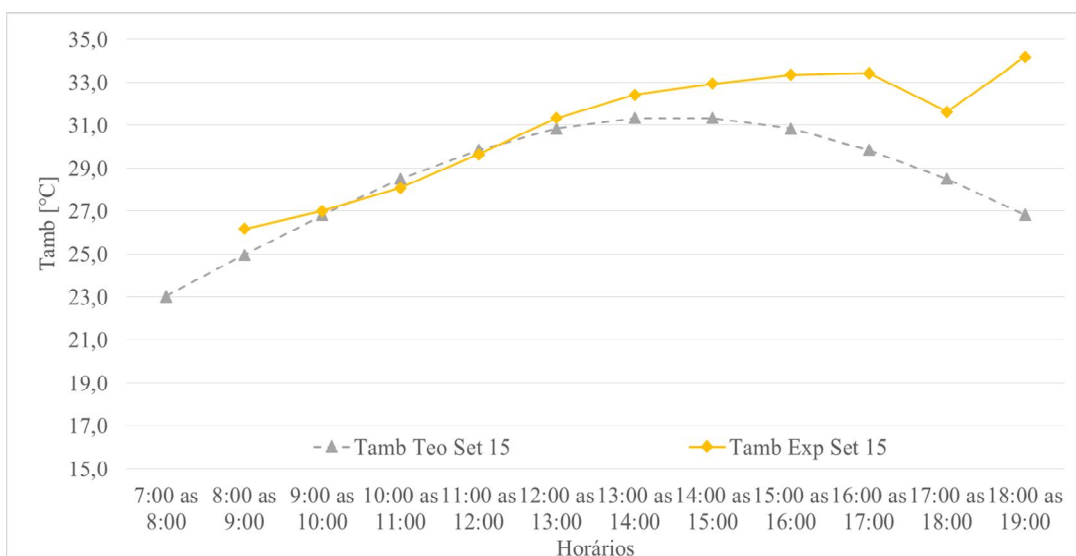


Figura 5.7 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, setembro de 2015.

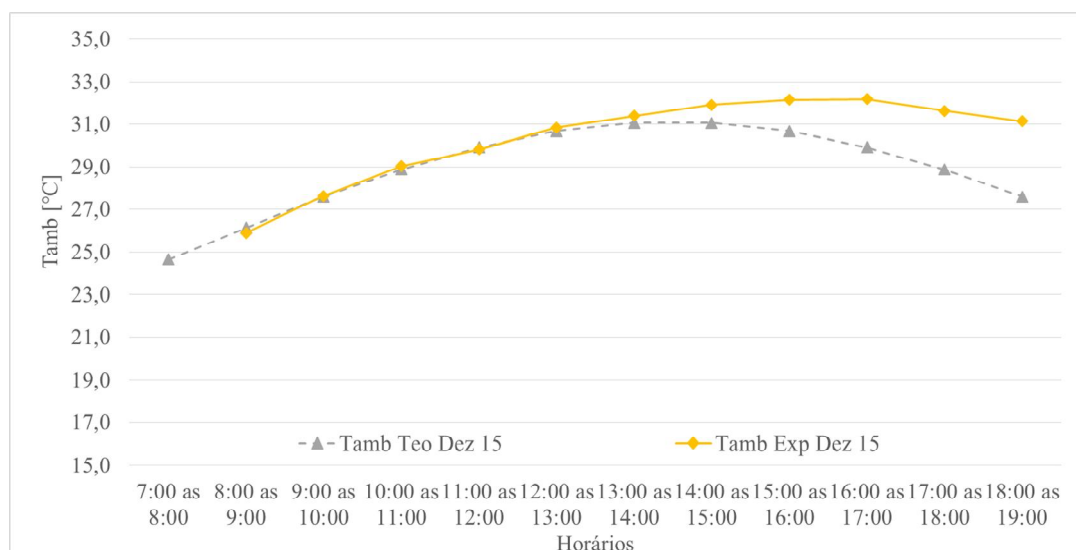


Figura 5.8 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente, dezembro de 2015.

A Fig. 5.9 apresenta os perfis das médias das temperaturas experimentais mensais na entrada das placas solares (T_{epExp}), saída das placas solares (T_{spExp}) e temperaturas ambiente (T_{ambExp}) medidas ao longo do dia, para os 12 meses de monitoração. Conforme pode ser visto, as variações das temperaturas ao longo do ano acompanham a previsibilidade já proposta pelas estações climáticas, na cidade de Birigui SP, ou seja, temperaturas mais altas no outono e primavera, temperaturas mais baixas no inverno e temperaturas intermediárias no verão, em função de ser o período chuvoso da região.

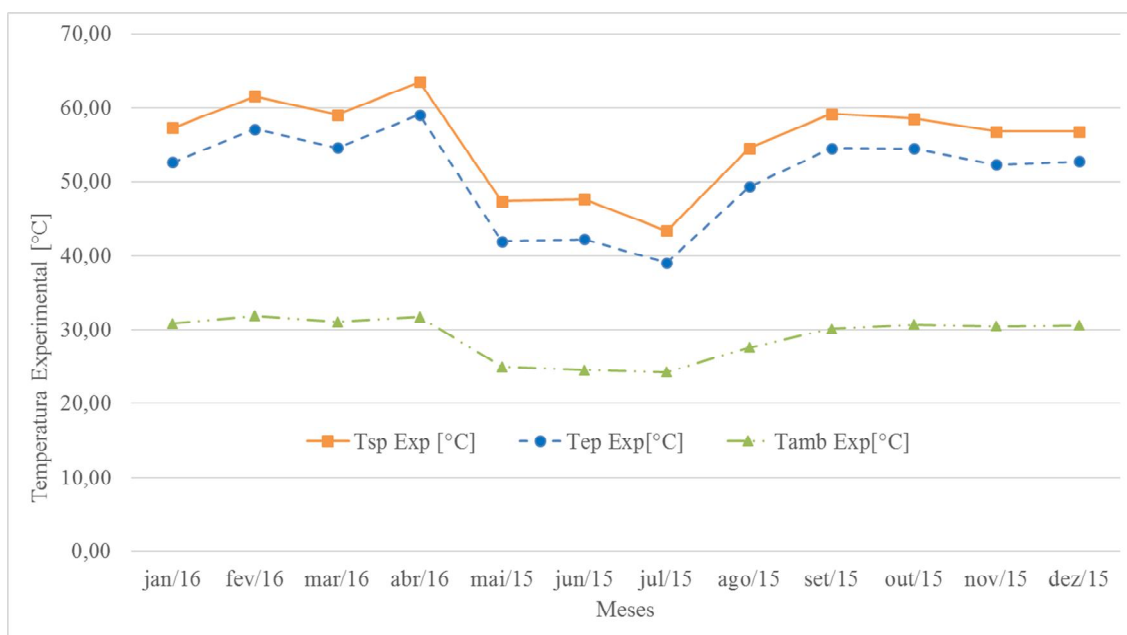


Figura 5.9 – Temperaturas experimentais nas placas solares e ambiente.

Além disso, a Tab. 5-2 apresenta as médias mensais das temperaturas experimentais na entrada nas placas solares ($T_{ep\ Exp}$), das temperaturas experimentais na saída das placas solares ($T_{sp\ Exp}$) e das temperaturas experimentais ambiente ($T_{amb\ Exp}$), respectivamente, assim como os aumentos de temperatura, também em média mensal, entre entrada e saída das placas solares. Nota-se que, os aumentos de temperatura nas placas solares são maiores nos meses de maio, junho, julho e agosto de 2015, justamente os meses em que a $T_{ep\ Exp}$ apresenta as menores médias registradas. Portanto, a $T_{ep\ Exp}$ pode ter grande influência na determinação dos referidos aumentos de temperaturas nas placas solares.

Tabela 5-2– Temperaturas experimentais e teóricas ambiente.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
Tsp Exp [°C]	57,3	61,6	59,0	63,4	47,4	47,7	43,4	54,6	59,1	58,5	56,8	56,8	55,5
Tep Exp [°C]	52,7	57,1	54,6	59,0	41,9	42,2	39,1	49,4	54,5	54,5	52,3	52,8	50,8
Tsp Exp [°C] - Tep Exp [°C]	4,6	4,5	4,5	4,4	5,5	5,4	4,4	5,2	4,6	4,0	4,4	4,0	4,6
Tamb Exp [°C]	30,8	31,9	31,0	31,7	25,0	24,6	24,2	27,6	30,1	30,7	30,4	30,6	29,0

A Fig. 5.10 apresenta uma comparação entre as temperaturas experimentais e teóricas na entrada nas placas solares e ambiente, respectivamente. Nota-se que a o desvio entre $T_{ep\ Exp}$ e $T_{ep\ Teo}$ é significativo (exceto nos meses de maio, junho e julho) e provavelmente impactará

na análise comparativa entre eficiência térmica e produção de energia específica das placas solares, sobretudo pelo fato da T_{epTeo} admitida como constante, ao longo do ano. Quanto as T_{ambExp} e T_{ambTeo} , o desvio é relativamente pequeno.

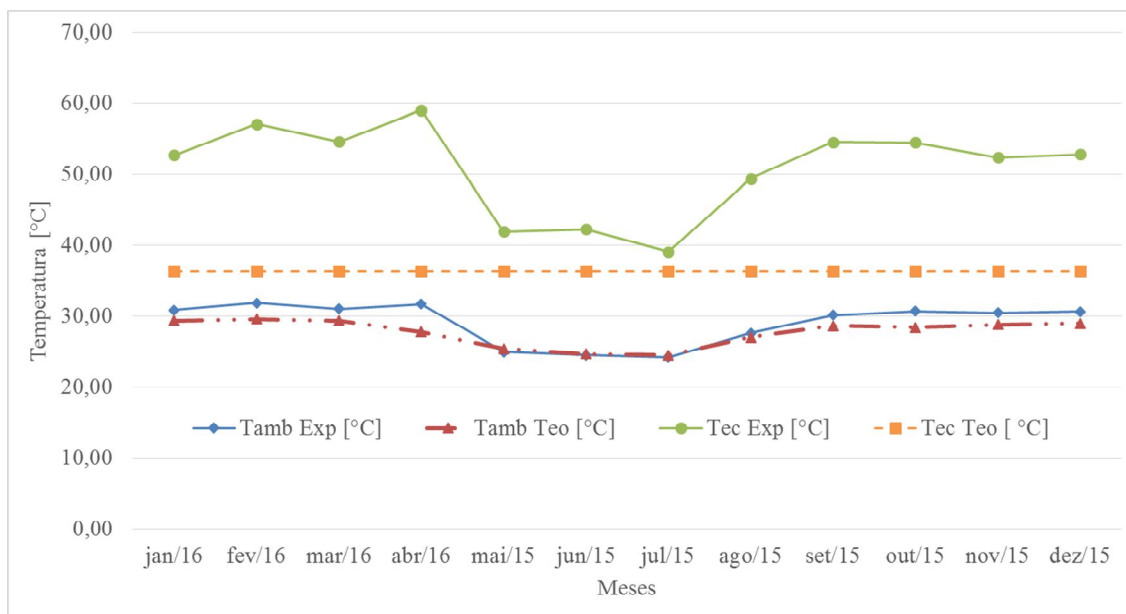


Figura 5.10 – Temperatura de entrada nas placas solares e ambiente experimental e teórica.

A Tab. 5-3 mostra, quantitativamente, que o desvio percentual entre T_{ambExp} e T_{ambTeo} é, em média mensal, de - 4,3 % (valor de referência é sempre o experimental), o que é considerado relativamente baixo e possibilita a adoção do modelo teórico para cálculo estimado de T_{amb} em substituição aos dados experimentais, quando houver dificuldades no uso da instrumentação.

Tabela 5-3 – Temperaturas experimentais e teóricas ambiente.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
Tamb Exp[°C]	30,8	31,9	31,0	31,7	25,0	24,6	24,2	27,6	30,1	30,7	30,4	30,6	29,0
Tamb Teo [°C]	29,3	29,5	29,3	27,8	25,5	24,7	24,5	27,0	28,6	28,4	28,8	28,9	27,7
Desvio Percentual	-4,8%	-7,3%	-5,6%	-12,4%	2,0%	0,7%	1,2%	-2,0%	-5,1%	-7,4%	-5,4%	-5,5%	-4,3%

A Tab. 5-4 também permite quantificar o desvio percentual, em média mensal, entre T_{epExp} e T_{epTeo} . Nota-se que o mesmo é significativo, conforme já mencionado anteriormente, exceto nos meses de Maio, Junho e Julho.

Tabela 5-4 – Temperaturas experimentais e teóricas de entrada nas placas solares.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
Tep Exp [°C]	52,7	57,1	54,6	59,0	41,9	42,2	39,1	49,4	54,5	54,5	52,3	52,8	50,8
Tep Teo [°C]	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4
Desvio Percentual	-30,9%	-36,3%	-33,3%	-38,3%	-13,2%	-13,8%	-6,8%	-26,3%	-33,3%	-33,2%	-30,5%	-31,0%	-27,2%

Na Fig. 5.11, são apresentados os perfis das médias das temperaturas mensais relacionadas a entrada e saída no reservatório térmico, ou seja, as temperaturas experimentais de entrada água fria (T_{af}), as temperaturas experimentais de saída de água quente (T_{aq}) e medidas ao longo do dia, para os 12 meses de monitoração e em referência à $T_{amb Exp}$.

Nota-se, na Tab. 5-5, que o aumento entre T_{aq} e T_{af} é, em média mensal, de 22,9 °C. Além disso, nota-se que T_{aq} ultrapassa o valor de 50°C em 9 dos 12 meses de monitoração.

Tabela 5-5 – Temperaturas experimentais na entrada e saída no reservatório térmico.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
Taq [°C]	53,0	56,8	54,8	58,0	43,7	44,0	41,7	50,4	54,2	55,3	52,9	52,0	51,4
Taf [°C]	30,5	31,6	30,6	31,0	24,7	24,0	23,8	26,5	29,0	30,0	30,2	30,2	28,5
Taq [°C] - Taf [°C]	22,5	25,3	24,2	27,0	19,1	20,1	17,9	23,9	25,2	25,3	22,8	21,8	22,9

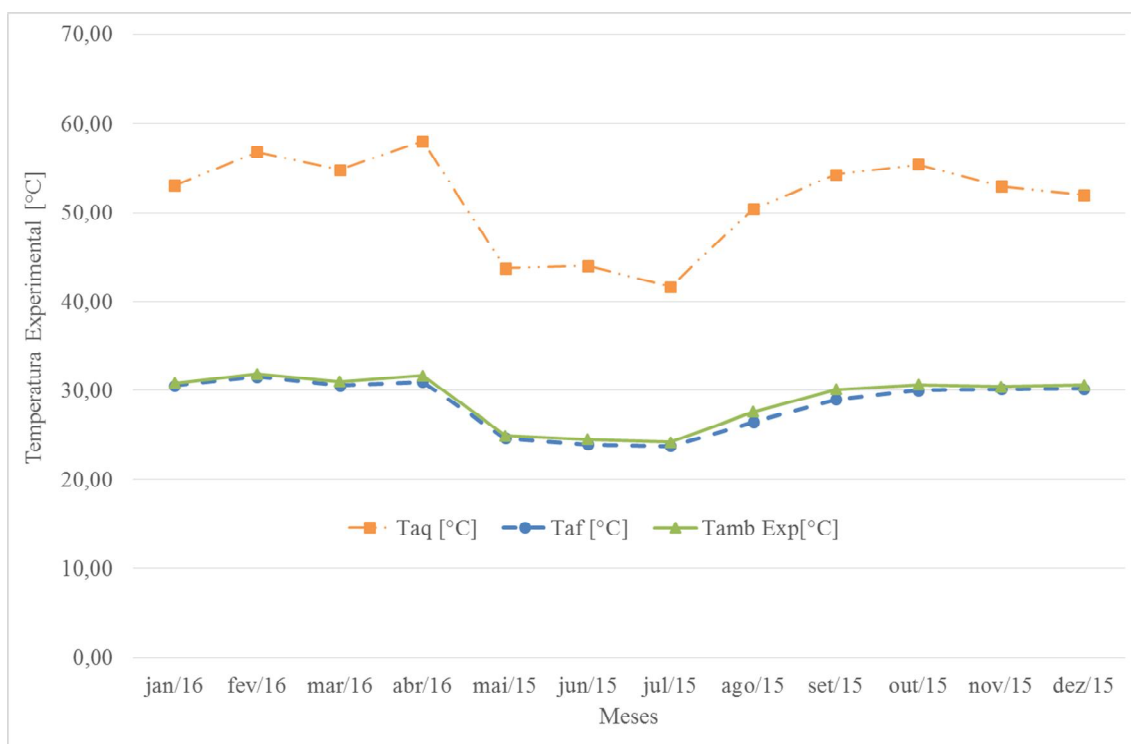


Figura 5.11 – Temperaturas experimentais no reservatório térmico e ambiente.

5.2 Irradiação Solar

A Fig. 5.12 apresenta os perfis das médias da irradiação solar mensal experimental incidente nas placas solares (G), medida em cada intervalo de uma hora em função do tempo, desde as 6:00hs às 19:00hs de cada dia, para os 4 meses de mudança de estação climática.

Observa-se na referida figura que os comportamentos dos perfis das médias de irradiação solar apresentam os menores picos no mês de dezembro de 2016, em função de ser um período tipicamente chuvoso e, portanto, de alta nebulosidade. Quanto ao mês de junho de 2016, apesar de se tratar da estação climática de inverno, é um período de céu claro para a região de Birigui SP, ou seja, baixa nebulosidade proporcionando um perfil de irradiação solar com pico maior que a estação climática do verão. Quanto aos meses de março de 2015 (estação climática outono) e setembro de 2016 (estação climática primavera), estes apresentam perfis de irradiação solar muito próximos e os de maior intensidade. É possível que o fato da inclinação das placas solares, no local de instalação, ser de apenas 19° e, portanto, mais próxima da latitude local ($-21,29^\circ$) do que da inclinação ótima recomendada na literatura ($latitude + 10^\circ$), ter impacto nos resultados apresentados, apontando os equinócios de outono e primavera como os pontos de maiores médias de irradiação solar.

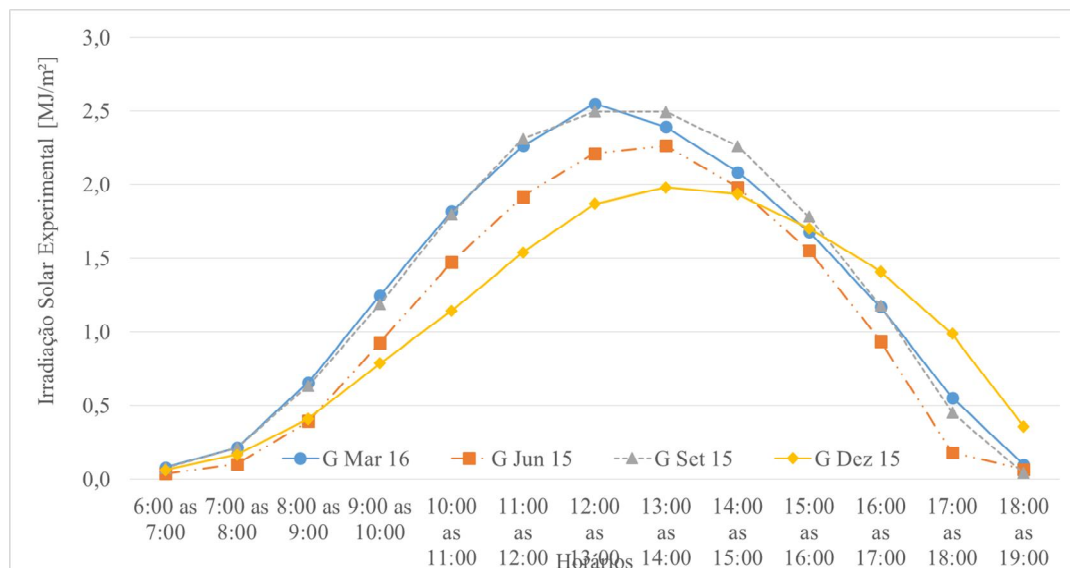


Figura 5.12 – Irradiação solar experimental.

A Fig. 5.13, apresentam os perfis das médias da irradiação solar mensais teóricos incidentes nas placas solares (I_T), calculados a partir dos modelos propostos no ANEXO B, a cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 6:00hs às 19:00hs para cada dia, durante os 4 meses de mudança de estação climática. Nota-se que há coerência na referida figura, quando comparada aos perfis de G na Fig. 5.12.

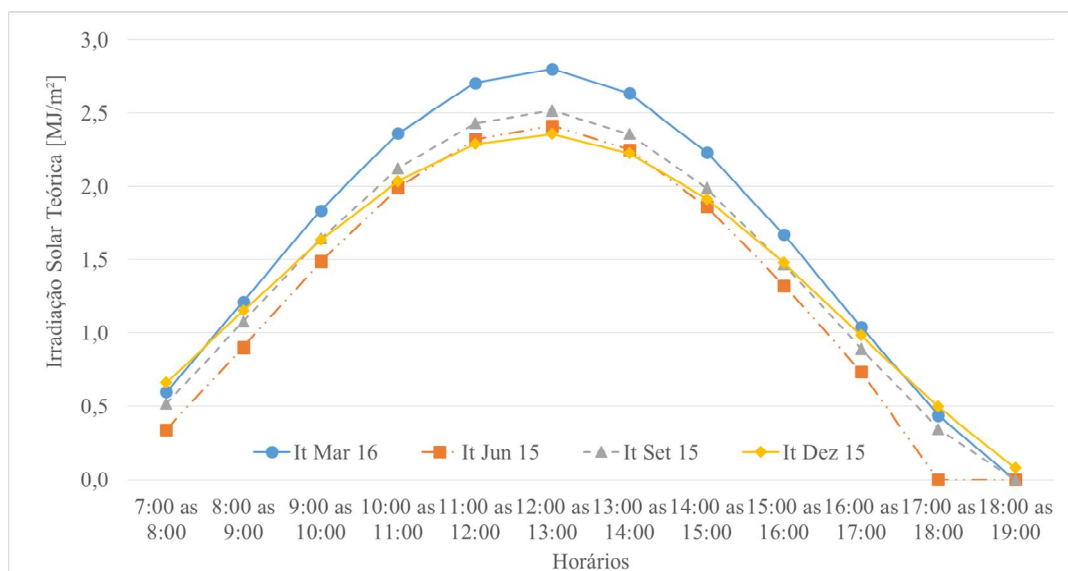


Figura 5.13 – Irradiação solar teórica.

As Figs. 5.14 a 5.17, apresentam uma comparação entre os perfis das médias da irradiação solar mensal experimental (G) e irradiação solar mensal teórica (I_T), respectivamente. Nota-se com mais clareza que nas referidas figuras, há coerência entre os perfis de irradiação solar. Em todas as figuras, as médias da irradiação solar experimentais (G) apresentam pontos de intensidade superiores às médias de irradiação solar teóricas (I_T) sistematicamente no período da tarde. Este fato pode ser observado, ainda com descrição, nos dados do mês de março de 2016 (Fig. 5.14), mas que se intensificam no mês de junho de 2015 (Fig. 5.15) e chega ao ápice no mês de setembro de 2015 (Fig. 5.16), respectivamente. Em dezembro de 2015 (Fig. 5.17), este fenômeno ainda pode ser observado, como sendo mais atenuado e influenciado pela nebulosidade típica desta época do ano, mas tendendo ao fechamento de um ciclo, que possivelmente se repetirá. É provável que o referido comportamento nos resultados, tenha relação com fato das placas solares, no local de instalação, estarem orientadas para o norte geográfico, com um desvio de 35° a oeste, fazendo com que as médias de irradiação solar experimental (G), no período da tarde, sejam maiores.

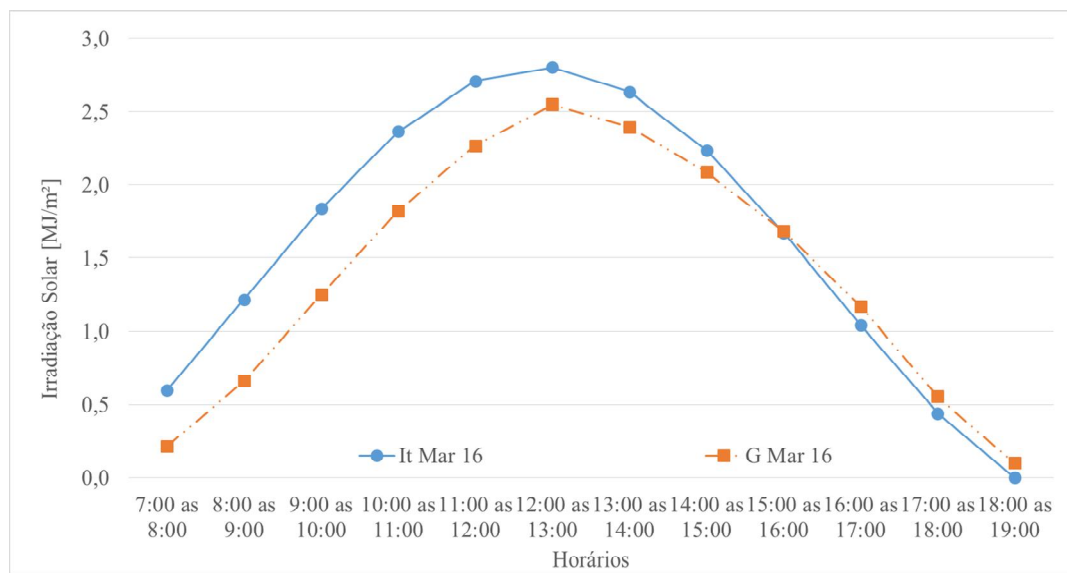


Figura 5.14 – Irradiação solar teórica e experimental, março de 2016.

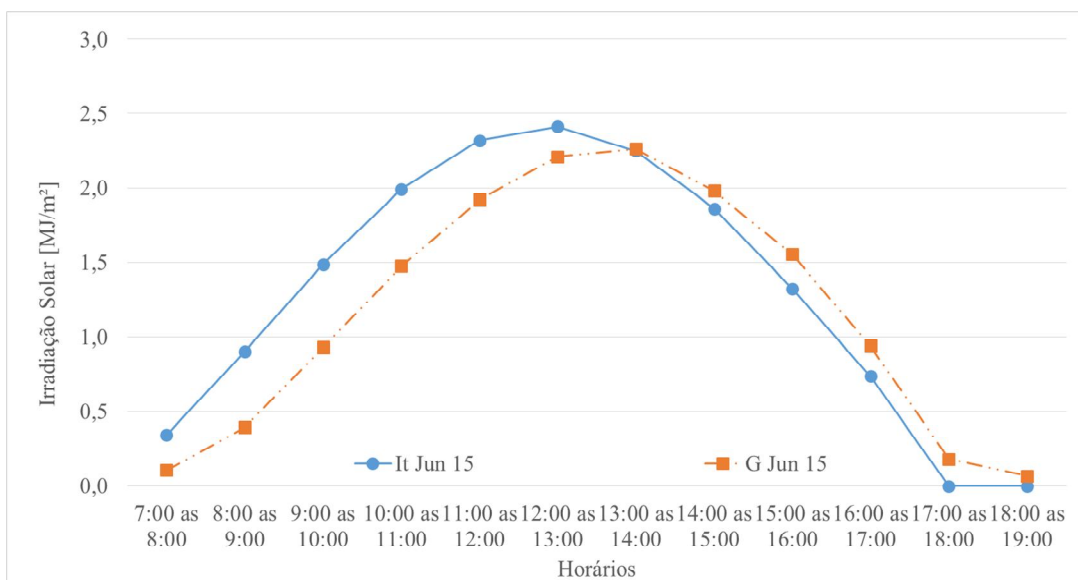


Figura 5.15 – Irradiação solar teórica e experimental, junho de 2015.

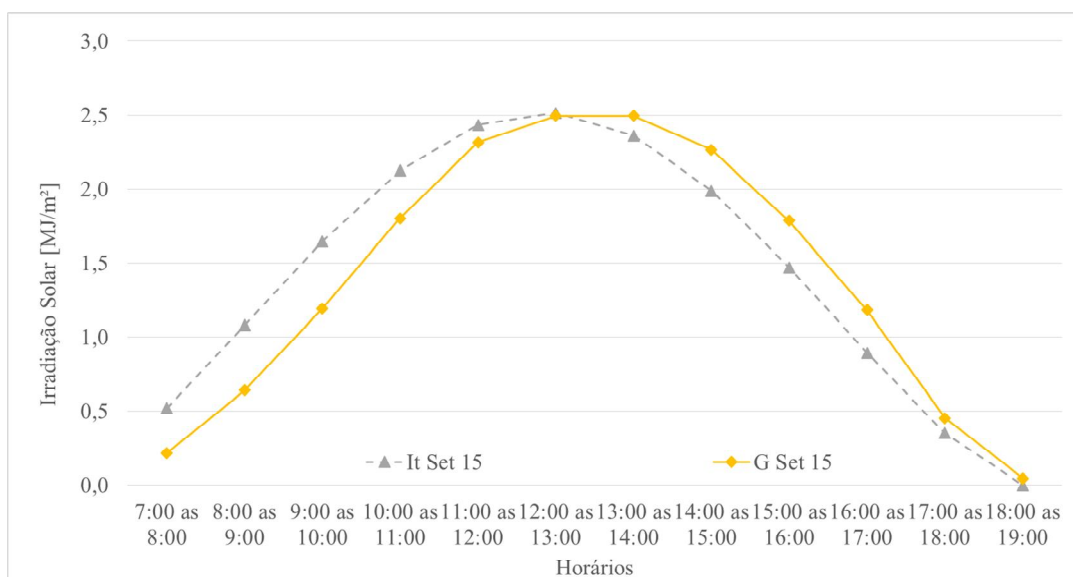


Figura 5.16 - Irradiação solar teórica e experimental, setembro de 2015.

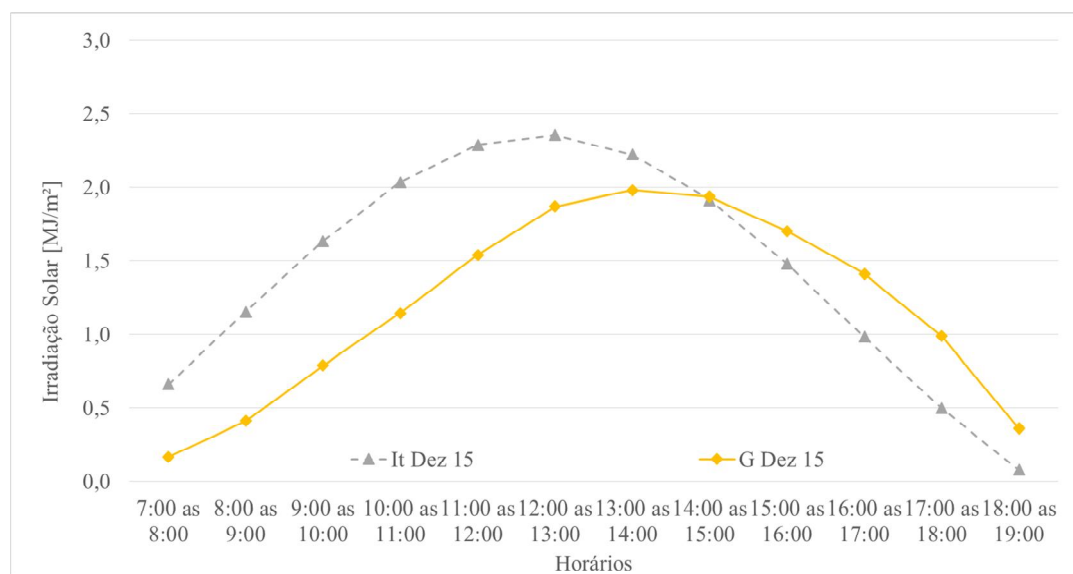


Figura 5.17 - Irradiação solar teórica e experimental, dezembro de 2015.

A Fig. 5.18 apresenta os perfis das médias da irradiação solar experimentais incidentes nas placas solares (G) e irradiação solar teóricos incidentes nas placas solares (I_T) medidas ao longo do dia, para os 12 meses de monitoração. Conforme pode ser visto, as variações da irradiação solar ao longo do ano acompanham a previsibilidade já proposta pelas estações climáticas, na cidade de Birigui SP, ou seja, irradiação solar mais intensa no outono e primavera. Sendo a irradiação solar menos intensa no inverno e intermediária no verão, em função deste também ser o período chuvoso da região. Nota-se também que o modelo teórico

de irradiação solar (I_T) é mais otimista, apresentando médias de irradiação mais intensas que G . É possível que isto ocorra pelo fato do modelo teórico permitir correções na orientação geográfica e inclinação das placas solares pouco eficazes. No modelamento matemático, a correção da orientação geográfica e inclinação, também é feita no cálculo da eficiência térmica das placas solares, através do fator de correção do ângulo de incidência ($K_{\tau\alpha}$).

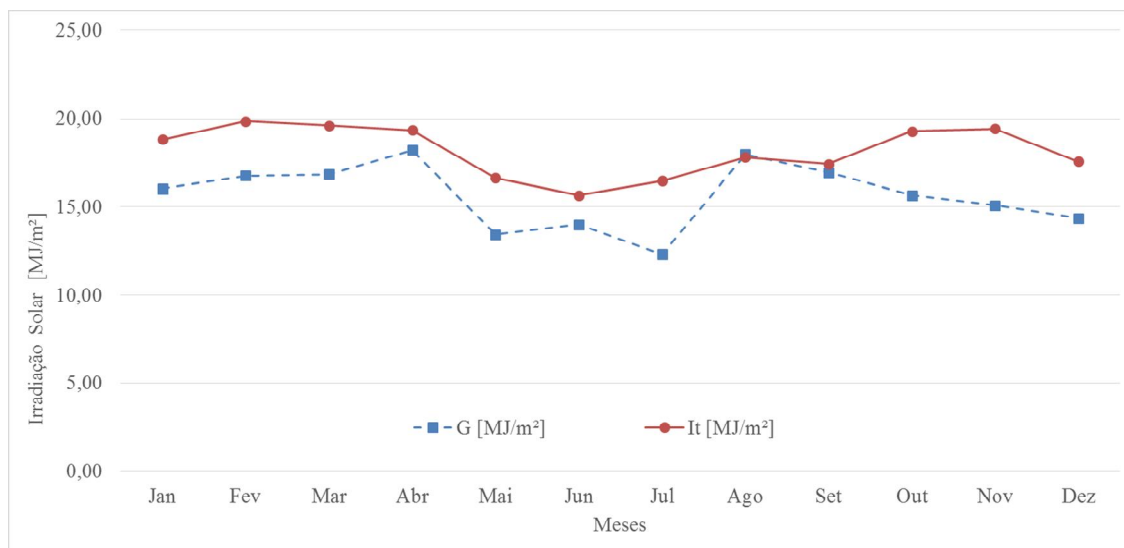


Figura 5.18 - Irradiação solar teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.

Além disso, na Tab. 5-6, nota-se que o desvio percentual, média mensal, entre G e I_T , é significativo em 9 dos 12 meses de monitoração, portanto, é recomendado que, preferencialmente, seja feita a medição da irradiação solar, sempre que possível.

Tabela 5-6 - Irradiação solar teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
G [MJ/m²]	16,0	16,7	16,8	18,2	13,4	14,0	12,3	18,0	16,9	15,7	15,1	14,4	15,6
It [MJ/m²]	18,8	19,9	19,6	19,4	16,6	15,6	16,5	17,8	17,4	19,3	19,4	17,5	18,2
Desvio Percentual	17,4%	18,6%	16,5%	6,3%	23,9%	11,9%	33,7%	-0,9%	2,9%	23,2%	28,8%	22,2%	17,0%

5.3 Vazão Volumétrica

A Fig. 5.19 apresenta os perfis das médias das vazões volumétricas experimentais nas placas solares ($\dot{V}_{ps\ Exp}$), em média mensal, medidas em cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 7:00hs às 19:00hs de cada dia, durante os 4 meses de mudança de estação climática. Além disso, acrescenta-se na Fig. 5.19 o perfil da vazão volumétrica teórica na

placa solar ($\dot{V}_{ps\ Teo}$), conforme calculado anteriormente e baseado no ANEXO C. Observa-se na referida figura, que os comportamentos dos perfis entre as vazões volumétricas na placa solar experimentais ($\dot{V}_{ps\ Exp}$) são similares e relevantes no período das 9:00hs as 17:00hs. Nota-se também que a discrepância entre $\dot{V}_{ps\ Exp}$ e $\dot{V}_{ps\ Teo}$ é extremamente significativa e provavelmente terá impacto no cálculo de eficiência térmica e produção mensal de energia.

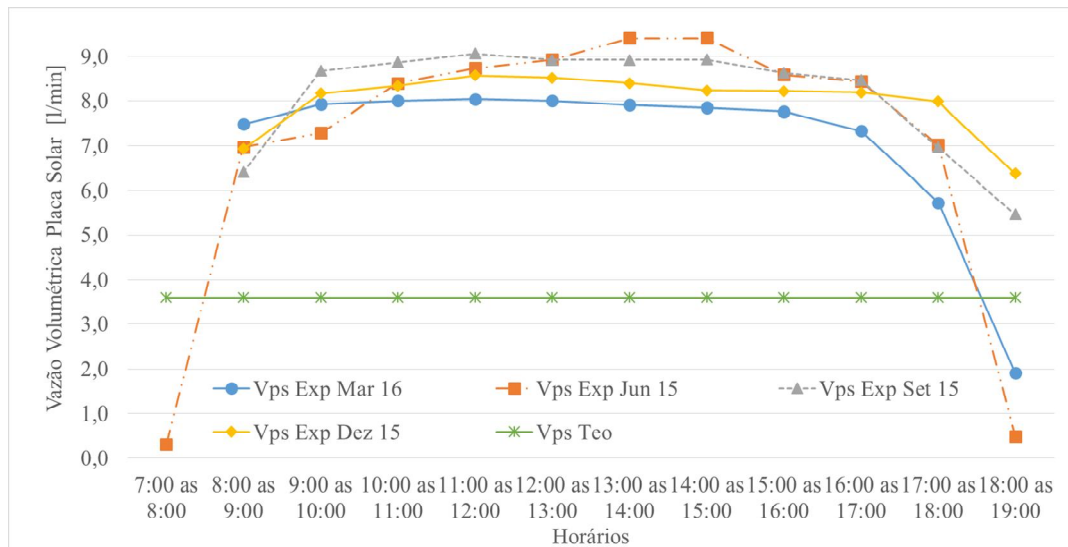


Figura 5.19 – Vazões volumétricas experimentais e teórica nas placas solares.

A Fig. 5.20 apresenta os perfis das médias das vazões volumétricas experimentais nas placas solares ($\dot{V}_{ps\ Exp}$) medidas ao longo do dia, para os 12 meses de monitoração e o perfil da vazão volumétrica teórica nas placas solares ($\dot{V}_{ps\ Teo}$) no mesmo período. Conforme pode ser visto, as variações da $\dot{V}_{ps\ Exp}$, ao longo do ano, são relativamente pequenas, contudo suas médias estão muito distantes dos valores da $\dot{V}_{ps\ Teo}$.

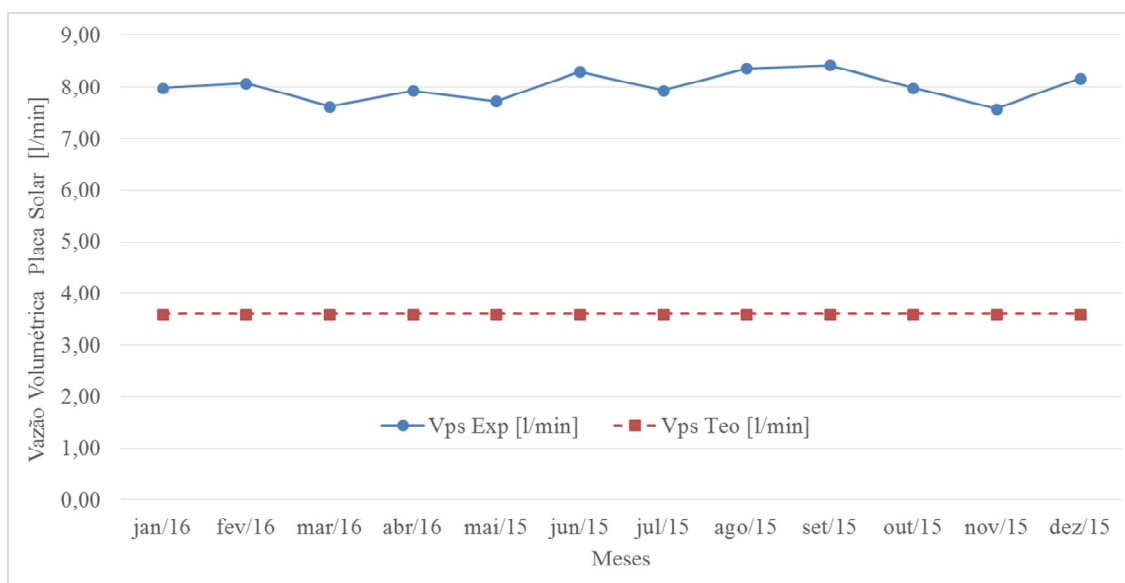


Figura 5.20 – Vazões volumétricas experimentais e teórica nas placas solares em dos 12 meses.

Nota-se na Tab. 5-7 que, em média mensal, o desvio percentual entre os valores de $\dot{V}_{ps\,Exp}$ e $\dot{V}_{ps\,Teo}$ é de -55 % (valor de referência é sempre o experimental). Vale reforçar que $\dot{V}_{ps\,Exp}$ somente foi monitorada e não controlada, assim como todo sistema em condição de uso. Isto significa que a vazão volumétrica experimental praticada nas placas solares é em média mensal, 2,2 vezes maior que o valor recomendado na ANSI/ASHARE Standart 93 – 2003.

Tabela 5-7 – Vazões volumétricas experimentais e teóricas nas placas solares.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
Vps Exp [l/min]	8,0	8,1	7,6	7,9	7,7	8,3	7,9	8,4	8,4	8,0	7,6	8,2	8,0
Vps Teo [l/min]	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Desvio Percentual	-54,9%	-55,4%	-52,8%	-54,6%	-53,4%	-56,6%	-54,7%	-57,0%	-57,3%	-54,9%	-52,5%	-55,9%	-55,0%

A Fig. 5.21 apresenta o perfil das médias do tempo de funcionamento diário da bomba hidráulica (t_b), medido ao longo do dia, para os 12 meses de monitoração. Como era de se esperar, o perfil acompanha a previsibilidade já proposta pelas estações climáticas, para a cidade de Birigui SP e conforme já observado nos perfis de temperaturas e irradiação solar, ou seja, tempo de funcionamento diário da bomba hidráulica, cujas médias são maiores no outono e primavera, menores no inverno e sendo intermediárias no verão, em função do período chuvoso na região.

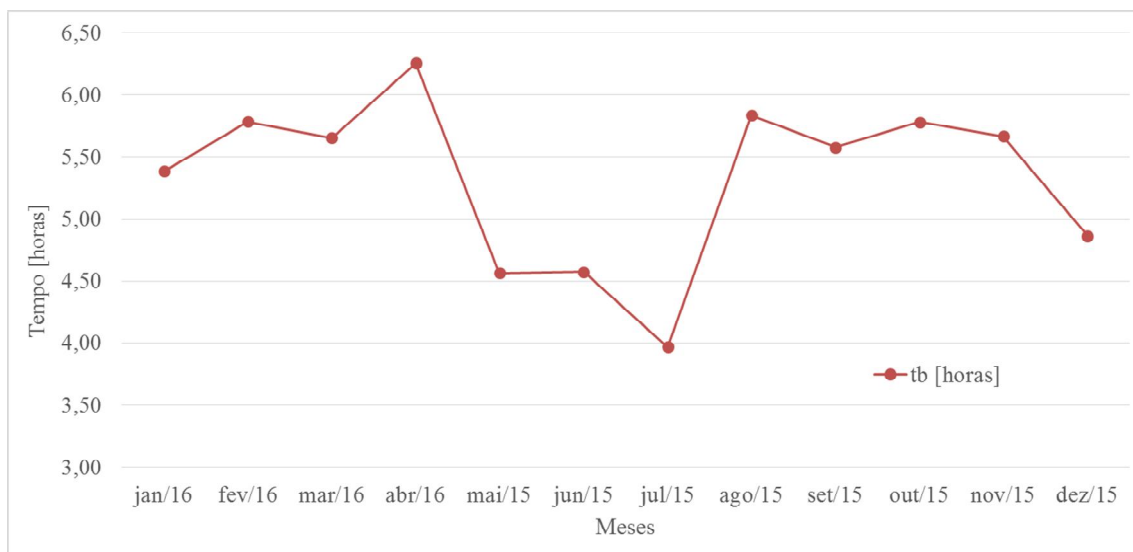


Figura 5.21 – Tempo de funcionamento diário da bomba hidráulica ao longo dos 12 meses.

A Tab. 5-8 reforça o que já foi observado anteriormente e apresenta, em média mensal, o equivalente a 5,3 horas para o tempo de funcionamento diário da bomba hidráulica.

Tabela 5-8 – Tempo funcionamento da bomba hidráulica em média diária em 12 meses.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
tb [h]	5,4	5,8	5,7	6,3	4,6	4,6	4,0	5,8	5,6	5,8	5,7	4,9	5,3

5.4 Eficiência Térmica

A Fig. 5.22 apresenta os perfis das médias das eficiências térmicas mensais experimentais das placas solares (η_{Exp}), medida a cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 7:00hs às 19:00hs de cada dia, durante os 4 meses de mudança de estação climática.

Observa-se na referida figura que o comportamento dos perfis das médias das eficiências térmicas experimentais (η_{Exp}), também apresentam os menores picos no mês de dezembro de 2015. Quanto ao mês de junho de 2015, apesar de ser o mês de início da estação climática de inverno, é o período de registro dos maiores picos de eficiência térmica experimental (η_{Exp}). Os meses de março de 2016 (estação outono) e setembro de 2015 (estação

primavera), apresentam níveis de eficiência térmica intermediárias, em relação aos 4 meses de referência e valores muito próximos.

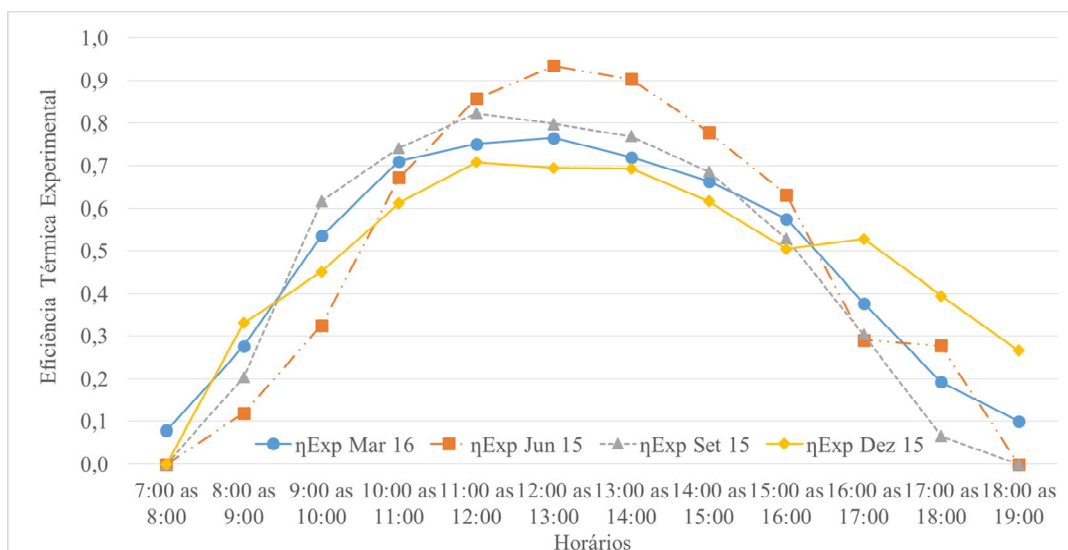


Figura 5.22 – Eficiências térmicas experimentais.

A Fig. 5.23, apresenta os perfis das médias das eficiências térmicas teóricas das placas solares (η_{Teo}), calculadas a partir da Eq. 4.2 e conforme ANEXO C, a cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 7:00hs às 19:00hs de cada dia, durante os 4 meses de mudança de estação climática. Nota-se que há coerência nos resultados da referida figura com os resultados da Fig. 5.22, exceto no perfil das médias do mês de junho de 2015.

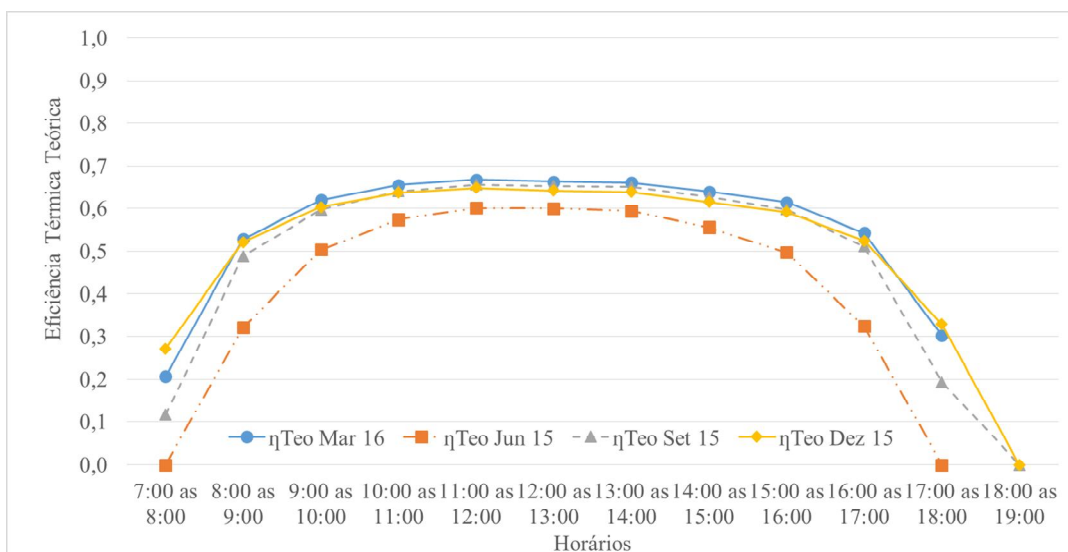


Figura 5.23 – Eficiências térmicas teóricas.

As Figs. 5.24 a 5.27, apresentam uma comparação entre os perfis das médias das eficiências térmicas mensais experimentais (η_{Exp}) e as eficiências térmicas mensais teóricas (η_{Teo}), respectivamente. Nota-se com mais clareza que nas referidas figuras, as médias da eficiência térmica experimental (η_{Exp}) apresentam pontos de maior intensidade, em relação às médias de eficiência térmica teórica (η_{Teo}), sistematicamente no período das 10:00hs às 15:00hs. Este fato pode ser observado, ainda com descrição, nos perfis do mês de março de 2016 (Fig. 5.24), chegando ao máximo de intensidade no mês de junho de 2015 (Fig. 5.25). Em seguida, os perfis voltam a níveis moderados no mês de setembro de 2015 (Fig. 5.26), respectivamente. Em dezembro de 2015 (Fig. 5.27), o referido fenômeno ainda pode ser observado, em intensidades mínimas, devido a interferência da nebulosidade típica desta época do ano, com tendência ao fechamento do ciclo, que possivelmente se repetirá.

É possível que o resultado apresentado para o mês de junho de 2015, tenha relação direta com o fato das temperaturas experimentais de entrada nas placas solares (T_{epExp}) variar ao longo do ano e ter apresentado os menores registros, como era de se esperar para o período de inverno, que por sua vez faz com que os aumentos de temperaturas nas placas solares sejam os maiores possíveis, conforme Tab. 5-2, assim como a eficiência térmica experimental (η_{Exp}). Além disso, o fato da temperaturas teóricas de entrada nas placas solares (T_{epTeo}) em média mensal ser constante, para o cálculo da eficiência térmica teórica (η_{Teo}), também contribui para a grande discrepância entre os resultados.

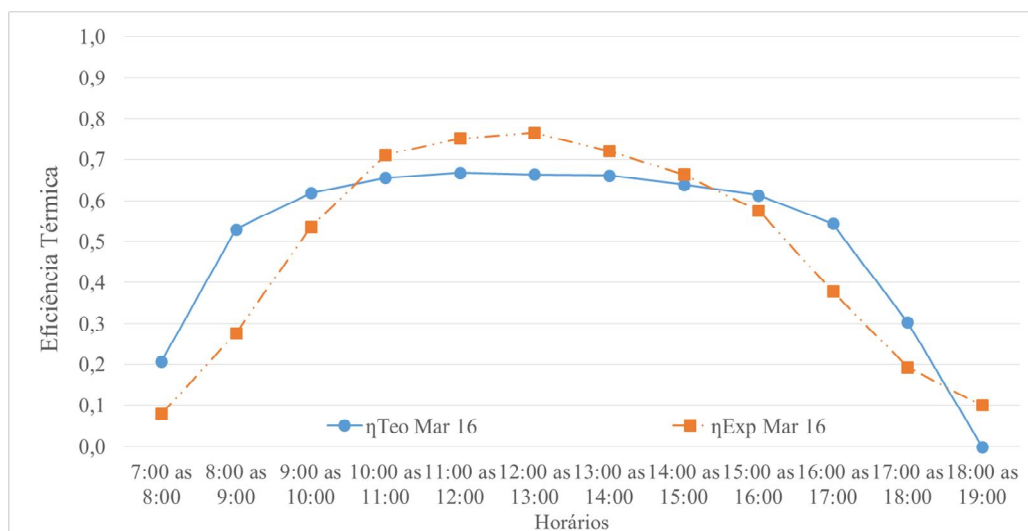


Figura 5.24 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, março de 2016.

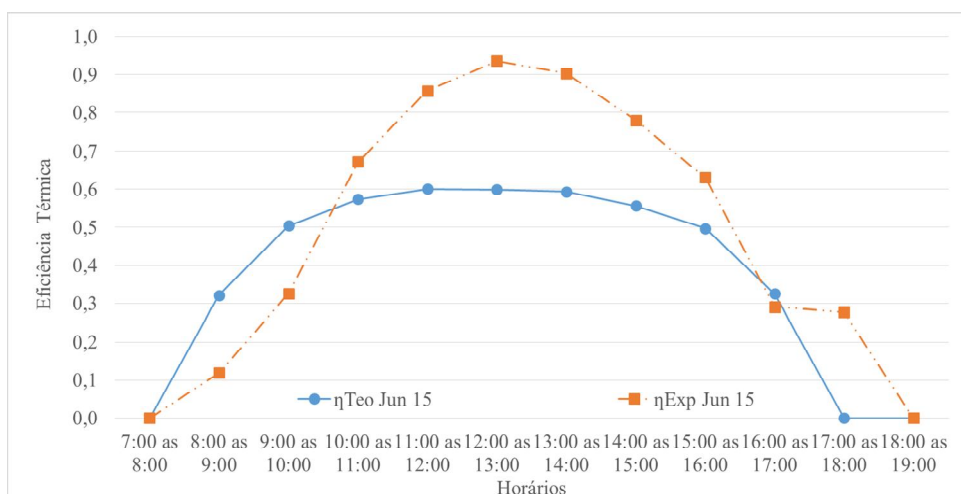


Figura 5.25 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, junho de 2015.

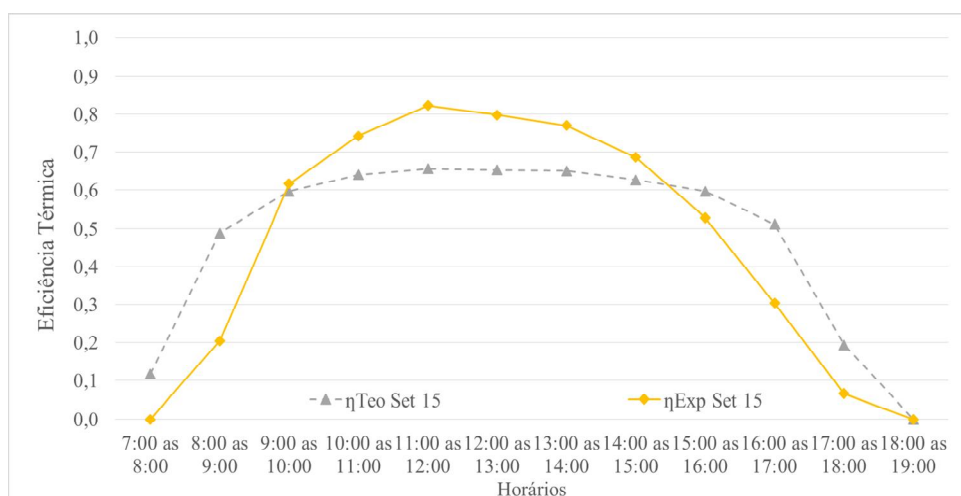


Figura 5.26 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, setembro de 2015.

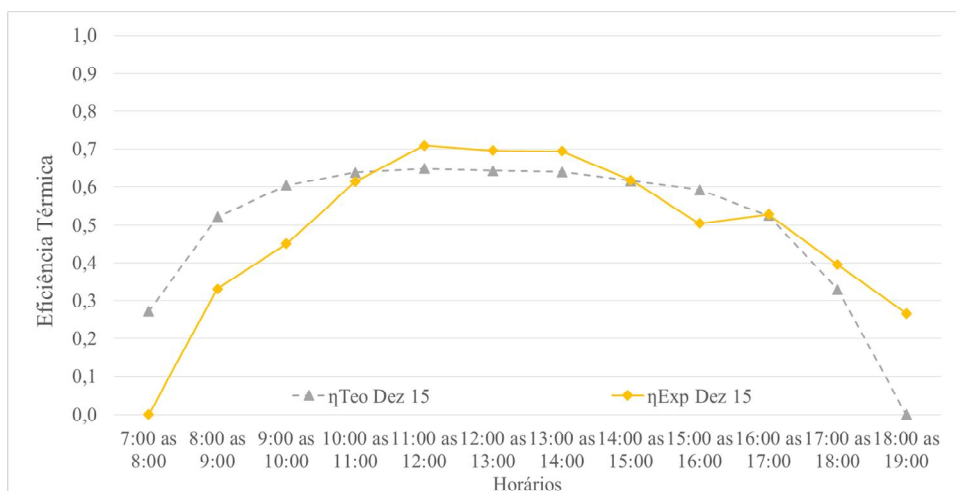


Figura 5.27 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais, dezembro de 2015.

A Fig. 5.28 apresenta os perfis das médias das eficiências térmicas experimentais nas placas solares (η_{Exp}) e eficiências térmicas teóricas nas placas solares (η_{Teo}) medidas ao longo do dia, para os 12 meses de monitoração. Além disso, a referida figura apresenta, como referência, a eficiência térmica da etiqueta do INMETRO das placas solares. A discrepância entre os perfis das médias das eficiências térmicas, encontram-se entre os meses de maio a agosto de 2015, ou seja, os meses de menores temperaturas ambientes (T_{ambExp} e T_{ambTeo}) e, portanto, menores temperaturas experimentais de entrada nas placas solares (T_{epExp}). Esta situação é propícia para o aumento das temperaturas nas placas solares e por consequência, aumento das eficiências térmicas experimentais (η_{Exp}). Este fenômeno não ocorre no perfil das eficiências térmicas teóricas (η_{Teo}), uma vez que o modelamento considera a temperatura de entrada teórica nas placas solares (T_{epTeo}) constante ao longo do ano, conforme Fig.5.10.

Além disso, nota-se também na Fig. 5.28 que, de modo geral, a η_{Exp} registra valores maiores que a η_{Teo} em praticamente todos os meses do ano, exceto dezembro de 2015. É possível que a vazão volumétrica experimental (\dot{V}_{psExp}) também tenha contribuído significativamente para este resultado, conforme Eq. 4.1, visto que a mesma é 2,2 vezes maior que a vazão volumétrica teórica (\dot{V}_{psTeo}), conforme Tab. 5-7. Muito provavelmente, se a \dot{V}_{psExp} fosse igual a \dot{V}_{psTeo} , o resultado da η_{Exp} estaria muito aquém do apresentado. Esta observação produz uma reflexão, no sentido de questionar se a vazão mássica de teste (conforme ANEXO C), que por sua vez gera a vazão volumétrica teórica (\dot{V}_{psTeo}) é de fato a melhor opção de vazão volumétrica a ser recomendada na operação das placas solares.

Além disso, na Tab. 5-6, nota-se que o desvio percentual, média mensal, entre η_{Exp} e η_{Teo} , é significativo em 8 dos 12 meses de monitoração. Portanto, conforme já apresentado, é possível que a temperatura de entrada nas placas solares (T_{ep}) e a vazão volumétrica nas placas solares (\dot{V}_{ps}) sejam as variáveis de maior impacto neste resultado.

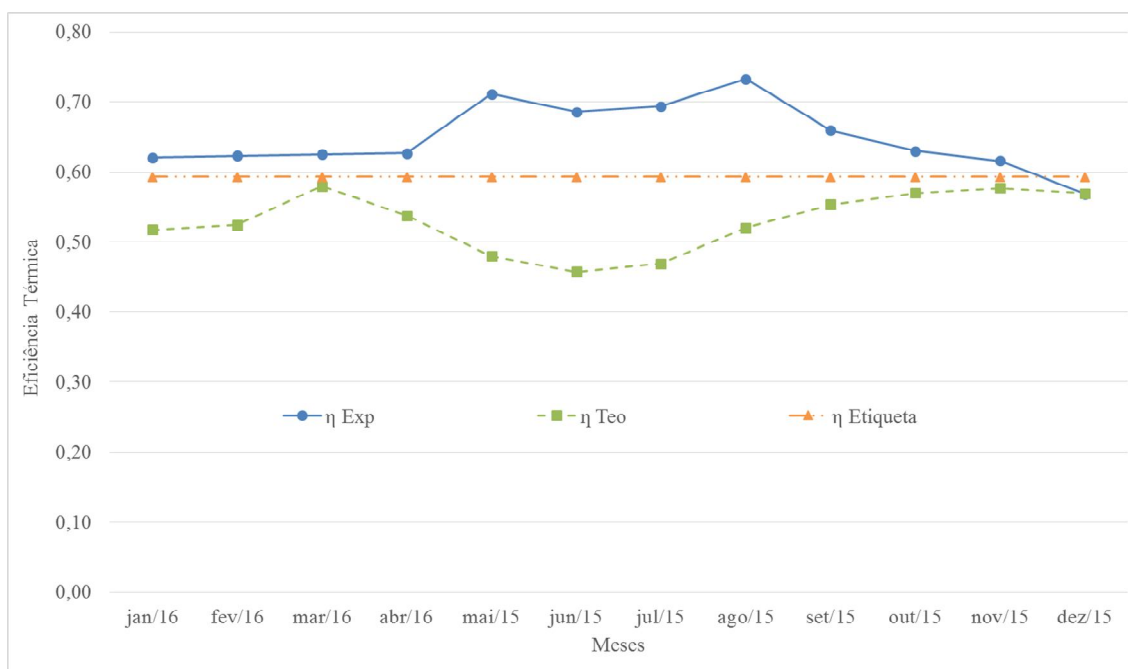


Figura 5.28 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.

Tabela 5-9 – Eficiências térmicas teóricas e experimentais ao longo dos 12 meses.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
η Exp	0,62	0,62	0,63	0,63	0,71	0,69	0,69	0,73	0,66	0,63	0,62	0,57	0,65
η Teo	0,52	0,52	0,58	0,54	0,48	0,46	0,47	0,52	0,55	0,57	0,58	0,57	0,53
Desvio Percentual	-16,61%	-15,86%	-7,28%	-14,24%	-32,47%	-33,27%	-32,34%	-28,96%	-15,97%	-9,50%	-6,37%	0,10%	-17,73%

5.5 Produção Mensal de Energia

A Fig. 5.29 apresenta os perfis das médias da produção mensal de energia específica experimental nas placas solares ($PMEe_{Exp}$), medida a cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 7:00hs às 19:00hs de cada dia, durante os 4 meses de mudança de estação climática. A análise dos resultados segue a mesma linha de raciocínio já apresentada na eficiência térmica das placas solares.

Observa-se na referida figura que os comportamentos dos perfis das médias da produção mensal de energia específica experimental nas placas solares ($PMEe_{Exp}$), também apresentam os menores picos no mês de dezembro de 2015, assim como η_{Exp} e G . Quanto ao mês de junho de 2015, apesar de ser o mês de início da estação climática no inverno, é o

período de registro dos maiores picos $PMEe_{Exp}$, juntamente com o mês de setembro de 2015 (estação climática primavera). Quanto ao mês de março de 2016 (estação climática outono), apresenta níveis de $PMEe_{Exp}$ intermediários, entre os 4 meses de referência.

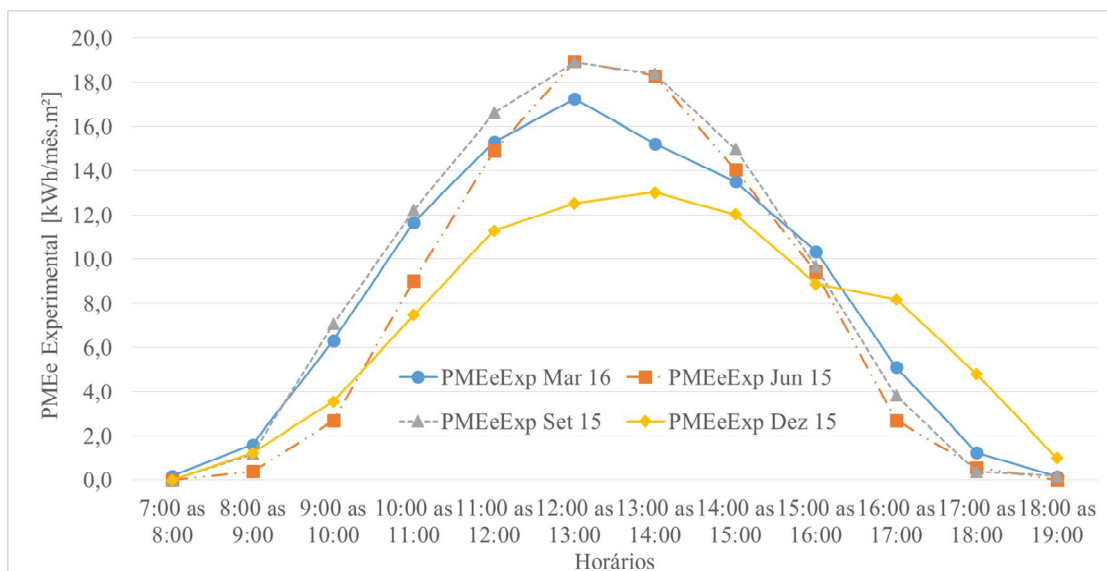


Figura 5.29 – Produção mensal de energia específica experimental.

A Fig. 5.30, apresenta os perfis das médias da produção mensal de energia específica teórica nas placas solares ($PMEe_{Teo}$), calculada conforme ANEXO C, a cada intervalo de uma hora, em função do tempo, desde as 7:00hs às 19:00hs de cada dia, durante os 4 meses de mudança de estação climática. Nota-se que há considerável discrepância nos resultados apresentados na referida figura, quando comparada aos perfis de $PMEe_{Exp}$, na Fig. 5.29.

As Figs. 5.31 a 5.34, representam uma comparação entre os perfis das médias da produção mensal de energia específica experimental nas placas solares ($PMEe_{Exp}$) e da produção mensal de energia específica teórica nas placas solares ($PMEe_{Teo}$), respectivamente. Nota-se com mais clareza que nas referidas figuras, as médias da $PMEe_{Exp}$ apresentam pontos de pico de intensidade superiores às médias $PMEe_{Teo}$. Este fato pode ser observado, ainda com descrição, nos dados do mês de março de 2016 (Fig. 5.31), a partir das 11:00hs, mas que se intensificam ao máximo no mês de junho de 2015 (Fig. 5.32) e no mês de setembro de 2015 (Fig. 5.33), a partir das 10:00hs, respectivamente. Em dezembro de 2015 (Fig. 5.34), este fenômeno ainda pode ser observado, contudo em níveis mínimos, a partir das 12:00hs,

devido a interferência da nebulosidade típica desta época do ano, porém tendendo ao fechamento de um ciclo, que possivelmente se repetirá.

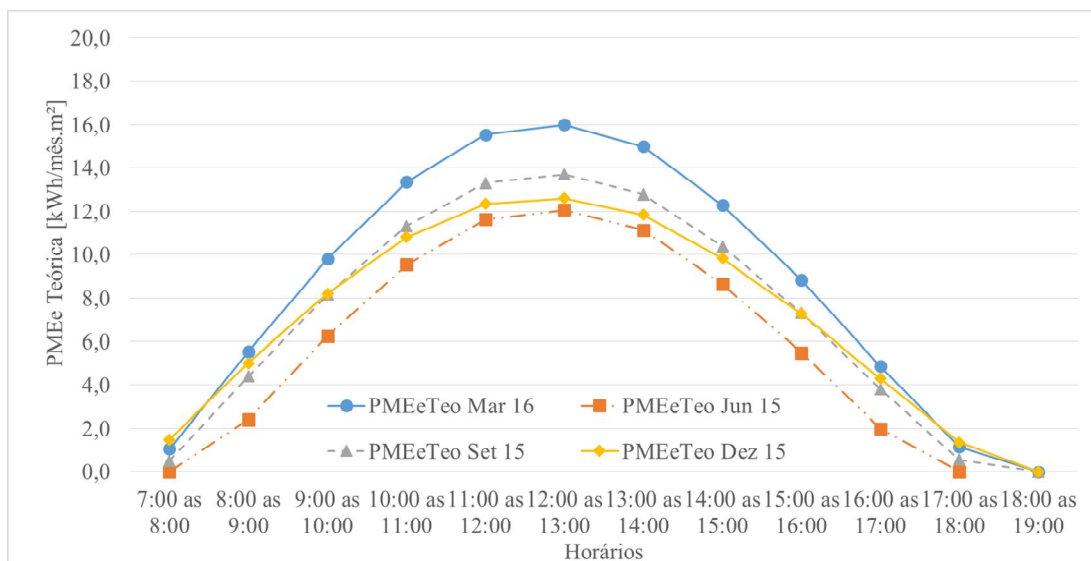


Figura 5.30 – Produção mensal de energia específica teórica.

É possível que os resultados apresentados para o mês de junho de 2015, tenham relação direta com o fato da temperatura das entradas experimentais nas placas solares (T_{epExp}) variar ao longo do ano e ter apresentado os menores registros, como era de se esperar no período de inverno, que por sua vez faz com que os aumentos de temperaturas nas placas solares sejam os maiores possíveis (conforme Tab. 5-2), assim como $PMEE_{Exp}$. Além disso, o fato das temperaturas teóricas de entrada nas placas solares (T_{epTeo}) em média mensal ser constante, também contribui para a grande discrepância entre os resultados. Quanto ao mês de setembro de 2016, é possível que a discrepância entre os resultados tenha relação direta com o fato deste ser o mês de registro da maior vazão volumétrica experimental nas placas solares, em média mensal, conforme Tab. 5-7.

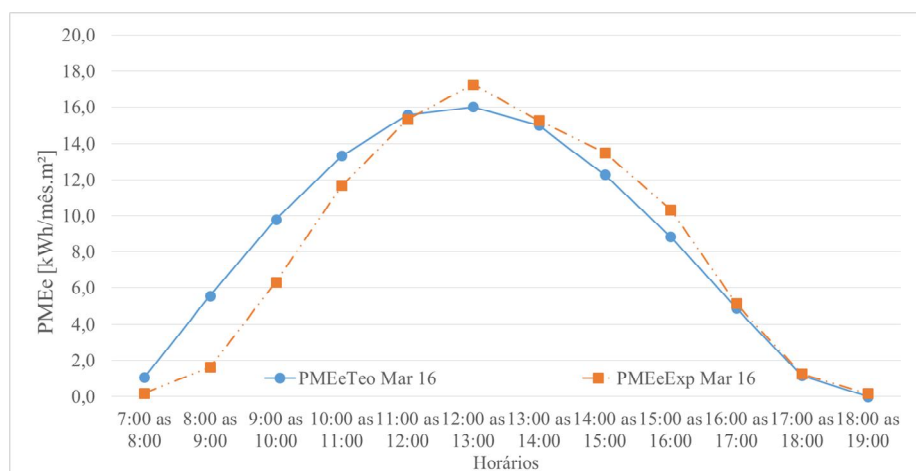


Figura 5.31 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, março de 2016.

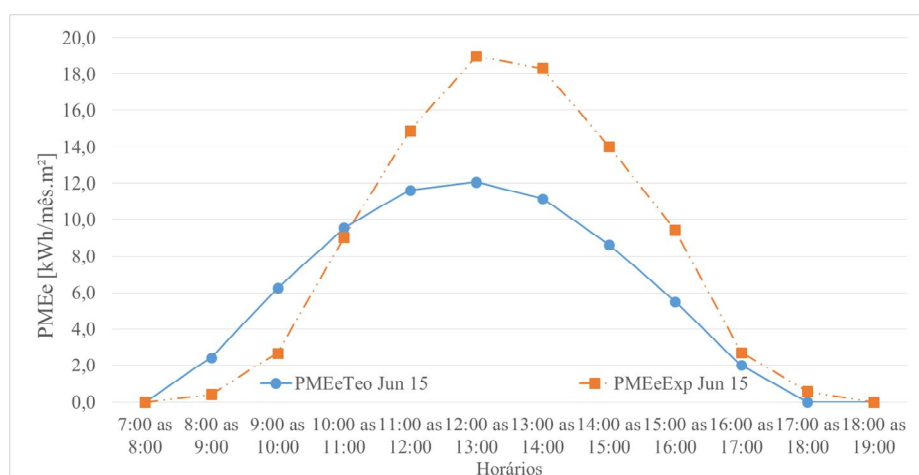


Figura 5.32 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, junho de 2015.

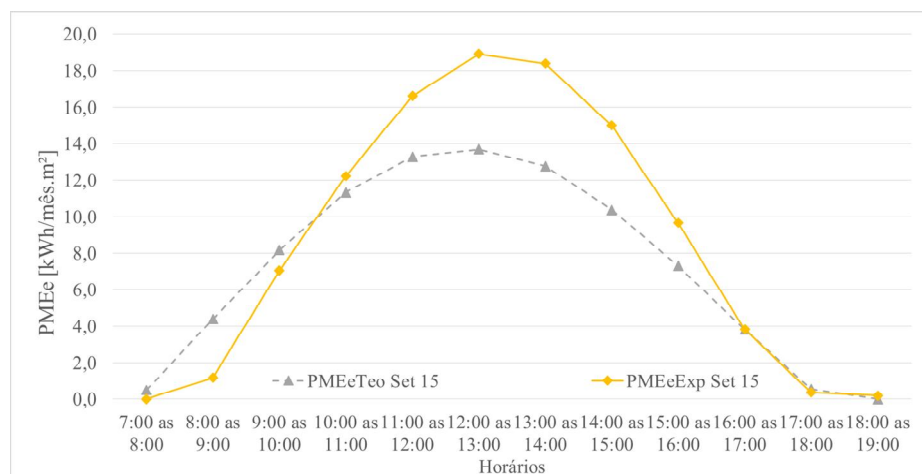


Figura 5.33 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, setembro de 2015.

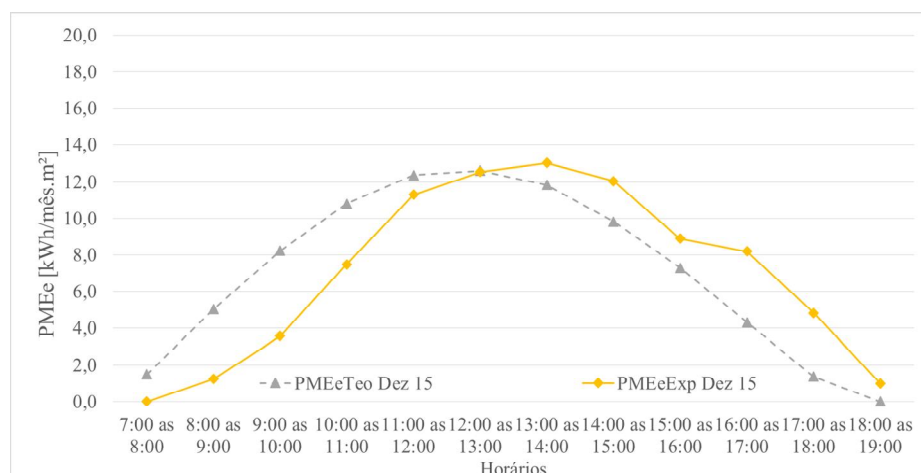


Figura 5.34 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental, dezembro de 2015.

A Fig. 5.35 apresenta os perfis das médias da produção mensal de energia específica experimental das placas solares ($PMEe_{Exp}$) e da produção mensal de energia específica teórica das placas solares ($PMEe_{Teo}$), medidas ao longo do dia, para os 12 meses de monitoração. Além disso, a referida figura apresenta, como referência, a produção mensal de energia específica da etiqueta do INMETRO das placas solares. Conforme pode ser visto, há coerência entre os perfis das médias de produção mensal de energia específica teórica e experimental. Foi registrado no mês de agosto de 2015 um desvio percentual mais significativo entre os perfis de $PMEe_{Exp}$ e $PMEe_{Teo}$, possivelmente pelo fato deste mês registrar a maior média mensal de G e \dot{V}_{psExp} , conforme Tab. 5-6 e Tab. 5-7, respectivamente.

Além disso, observa-se na Tab. 5-10 que a $PMEe_{Exp}$, em média mensal ao longo do ano, é apenas 3,6% menor que $PMEe_{Teo}$. Se for levado em consideração o fato de que I_T , em média mensal ao longo do ano, foi 17% maior que G , conforme Tab. 5-6, nota-se mais uma vez que o pequeno desvio percentual entre $PMEe_{Exp}$ e $PMEe_{Teo}$ possivelmente se deve à baixa temperaturas de entrada experimentais nas placas solares (T_{epExp}) nos meses de maio, junho, julho e agosto de 2015 e as vazões volumétricas experimentais (\dot{V}_{psExp}), cujo valor, em média mensal ao longo do ano, é 2,2 vezes maior que a vazão volumétrica teórica (\dot{V}_{psTeo}),

conforme Tab. 5-7. Muito provavelmente, se a \dot{V}_{psExp} fosse igual a \dot{V}_{psTeo} , o resultado da $PMEe_{Exp}$ estaria muito aquém do apresentado na Fig. 5.35. Esta observação reforça a reflexão sobre o fato das vazões volumétricas nas placas solares teóricas (\dot{V}_{psTeo}) ser realmente a melhor opção de vazão volumétrica a ser recomendada na operação das placas solares.

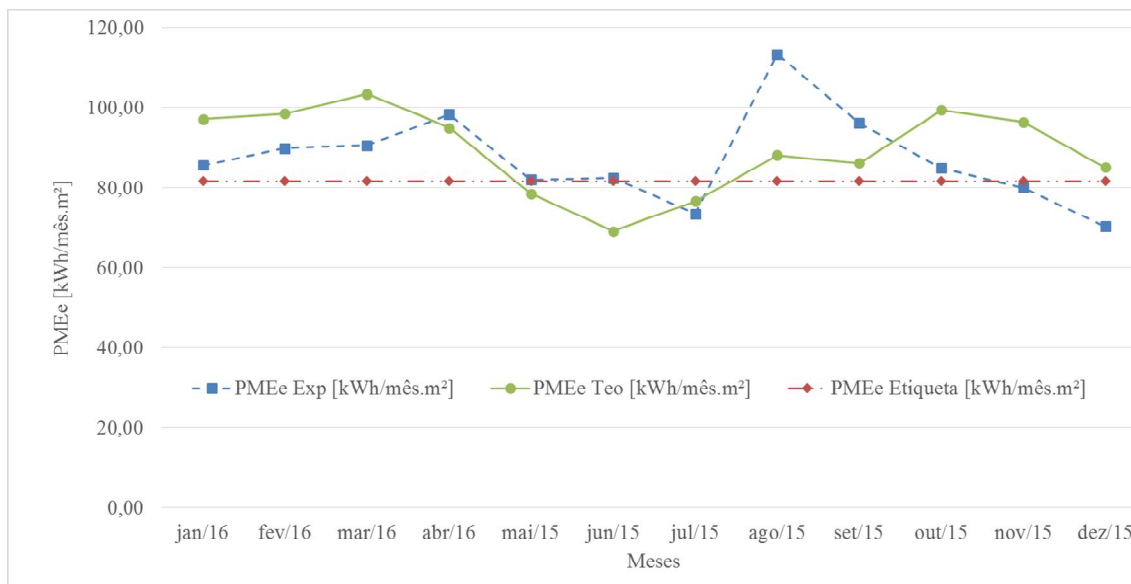


Figura 5.35 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental ao longo dos 12 meses.

.Tabela 5-10 – Produção mensal de energia específica teórica e experimental ao longo dos 12 meses.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
PMEe Exp [kWh/mês.m²]	85,7	89,9	90,7	98,3	82,1	82,5	73,5	113,3	96,1	85,0	80,1	70,3	87,3
PMEe Teo [kWh/mês.m²]	97,2	98,4	103,5	95,0	78,6	69,2	76,7	88,2	86,3	99,4	96,5	85,2	89,5
Desvio Percentual	13,4%	9,5%	14,1%	-3,4%	-4,3%	-16,1%	4,3%	-22,2%	-10,2%	16,9%	20,4%	21,1%	3,6%

5.6 Demanda Mensal de Energia

A Fig. 5.36 apresenta a relação entre os consumos mensais experimentais de água quente (V_{aq}) e o volume do reservatório térmico (V_{rt}). Nota-se que em 7 dos 12 meses o V_{aq} , em médias mensais, é menor ou igual a metade do V_{rt} . Apesar disso, nos meses mais frios o V_{aq} , em médias mensais, foi muito próximo V_{rt} .

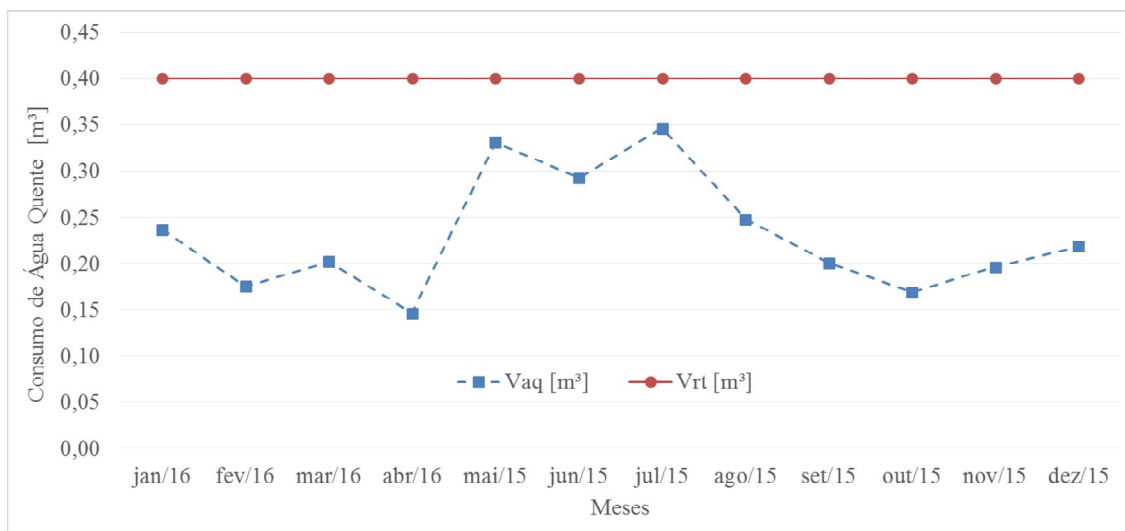


Figura 5.36 – Consumo de água quente experimental e teórico ao longo dos 12 meses.

De modo geral, nota-se na Tab. 5-11 que o V_{rt} está bem dimensionado visto que nos meses de menor temperatura ambiente experimental ($T_{amb\ Exp}$), ou seja, maio, junho e julho de 2016 (Fig. 5.9), o V_{aq} representou mais de 2/3 do V_{rt} , respectivamente.

Tabela 5-11 – Consumo de água quente experimental e volume do reservatório térmico.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
Vaq [m³]	0,24	0,18	0,20	0,15	0,33	0,29	0,35	0,25	0,20	0,17	0,20	0,22	0,23
Vrt [m³]	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Relação Vaq/Vrt	59,2%	43,8%	50,5%	36,5%	82,7%	73,2%	86,5%	62,0%	50,1%	42,2%	49,1%	54,6%	57,5%

A Fig. 5.37 apresenta a relação entre os perfis das médias da produção mensal de energia experimental das placas solares (PME_{Exp}), as médias da demanda mensal de energia (DME) e o consumo mensal de energia elétrica (CEE).

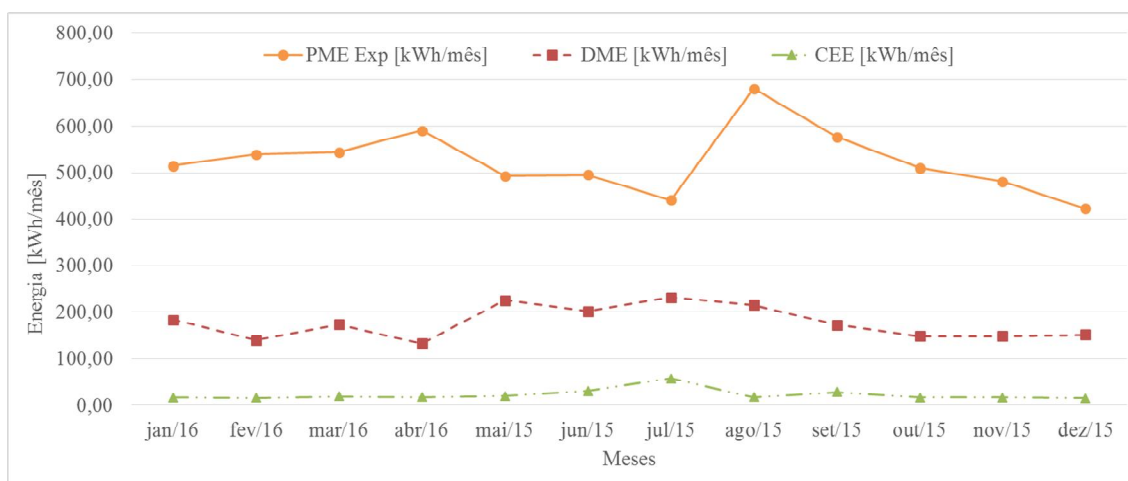


Figura 5.37 – Produção e demanda mensais de energia e consumo mensais de energia elétrica ao longo dos 12 meses.

A Tab 5-12 apresenta a relação entre DME e PME_{Exp} . Nota-se que a DME representa, em média mensal, 34,2% da PME_{Exp} . Conclui-se que as placas solares produzem muito mais energia térmica que a necessidade, portanto pode-se afirmar que há um super dimensionamento das placas solares.

Tabela 5-12 Produção mensal de energia e demanda mensal de energia ao longo dos 12 meses.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
PME Exp [kWh/mês]	514,2	539,4	544,0	590,1	492,7	495,2	441,0	680,0	576,6	510,0	480,6	422,1	523,8
DME [kWh/mês]	182,6	139,2	172,6	132,2	224,4	201,6	231,1	214,4	172,0	148,2	147,9	150,6	176,4
Relação DME / PME Exp	35,5%	25,8%	31,7%	22,4%	45,5%	40,7%	52,4%	31,5%	29,8%	29,1%	30,8%	35,7%	34,2%

A Tab. 5-13 apresenta a relação entre CEE e DME e nota-se que o consumo de energia elétrica no sistema de aquecimento solar é significativo e representou, em média mensal, 12,7% da demanda de energia térmica. Nota-se também que a produção mensal de energia é muito maior que a demanda de energia. Pode-se afirmar que o sistema de aquecimento solar está desbalanceado, do ponto de vista energético, pois sobra energia na produção térmica e consome-se energia elétrica em demasia. Além disso, é possível afirmar que esta situação não é isolada e, portanto, se repete na maioria dos sistemas de aquecimento solar residencial por circulação forçada.

Tabela 5-13 Consumo mensal energia elétrica e demanda mensal de energia em dos 12 meses.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
CEE [kWh/mês]	17,1	16,1	19,0	17,4	19,8	30,8	56,8	17,8	28,3	17,3	16,8	15,6	22,7
DME [kWh/mês]	182,6	139,2	172,6	132,2	224,4	201,6	231,1	214,4	172,0	148,2	147,9	150,6	176,4
Relação CEE/DME	9,4%	11,6%	11,0%	13,2%	8,8%	15,3%	24,6%	8,3%	16,4%	11,7%	11,3%	10,4%	12,7%

A Tab. 5-14 apresenta a relação entre CEE e PME_{Exp} e nota-se que o consumo de energia elétrica nas placas solares representou, em média mensal, 4,5% da produção mensal de energia térmica, que é considerado pouco significativo para um sistema com circulação forçada, desde que a maior parte da energia produzida fosse melhor utilizada e que o aumento na produção mensal de energia fosse significativo quando comparado a um sistema com circulação natural.

Tabela 5-14 Consumo mensal energia elétrica e produção mensal de energia em 12 meses.

Meses	jan/16	fev/16	mar/16	abr/16	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	Média
CEE [kWh/mês]	17,1	16,1	19,0	17,4	19,8	30,8	56,8	17,8	28,3	17,3	16,8	15,6	22,7
PME Exp [kWh/mês]	514,2	539,4	544,0	590,1	492,7	495,2	441,0	680,0	576,6	510,0	480,6	422,1	523,8
Relação CEE/PME Exp	3,3%	3,0%	3,5%	3,0%	4,0%	6,2%	12,9%	2,6%	4,9%	3,4%	3,5%	3,7%	4,5%

A seguir, são apresentadas as conclusões finais, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO 6 - CONCLUSÕES

O referido trabalho monitorou as principais variáveis que compõem o sistema de aquecimento solar em condições reais de uso. Além disso, foi possível calcular a eficiência térmica, a captação de energia das placas solares e compará-las aos modelos teóricos. Foi possível calcular a demanda de energia térmica, monitorar o consumo de energia elétrica do sistema e relacioná-los à captação de energia das placas. Os resultados e análises apresentados para o sistema de aquecimento solar monitorado, permitem concluir que:

- A temperatura teórica na entrada das placas solares (T_{epTeo}) mostrou-se muito abaixo das temperaturas experimentais, também na entrada das placas solares, (T_{epExp}) para todos os 4 meses de mudança de estação climática. Esta discrepância é relevante, se deve ao fato de T_{epTeo} ser extensivo ao Brasil e T_{epExp} restrito ao microclima de Birigui SP e também influenciado pela baixa demanda de energia térmica, o que impacta nos resultados da eficiência térmica.
- Os aumentos de temperatura nas placas solares são maiores nos meses em que as T_{epExp} apresentam as menores médias registradas. Portanto, a redução das T_{epExp} tem grande influência no aumento de temperatura nas placas solares e sua respectiva eficiência térmica.
- O desvio percentual entre as temperaturas experimentais e teóricas ambiente (T_{ambExp} e T_{ambTeo}) é muito pouco significativo e possibilita a adoção do modelo teórico em substituição aos dados experimentais, quando houver dificuldades no uso da instrumentação.
- O aumento da temperatura no reservatório térmico foi, em média mensal, acima de 20°C. Além disso, as temperaturas da água quente na saída do reservatório térmico (T_{aq}) atingiram valores acima de 50°C em 9 dos 12 meses de monitoração.
- As médias da irradiação solar experimentais (G) apresentam pontos de intensidade superiores às médias de irradiação solar teóricas (I_T), sistematicamente no período da tarde. Este comportamento tem relação com fato das placas solares estarem orientadas

para o norte geográfico, com um desvio de 35° a oeste, fazendo com que as G , no período da tarde, sejam maiores.

- A inclinação das placas solares, no local de instalação, difere da inclinação ótima recomendada na literatura ($latitude + 10^\circ$), o que contribui para que as maiores médias de irradiação solar estejam próximos aos meses de equinócio de outono (março) e primavera (setembro), respectivamente.
- O desvio percentual, em média mensal, entre as médias de G e I_T foi significativo, sendo I_T superior em mais de 15%, portanto, enfatiza-se a recomendação do uso de instrumentação para medição da irradiação solar e sempre alinhada às placas solares.
- A discrepância entre os valores de vazões volumétricas experimentais e teóricas nas placas solares (\dot{V}_{psExp} e \dot{V}_{psTeo}) foi significativo, chegando a ser mais que o dobro da referência teórica. Este fato implica em aumentos relevantes na eficiência térmica experimental (η_{Exp}) e produção mensal de energia específica experimental ($PMEe_{Exp}$) das placas solares.
- As médias da eficiência térmica experimental (η_{Exp}) apresentam pontos de maior intensidade, em relação às médias de eficiência térmica teórica (η_{Teo}), sistematicamente no período das 10:00hs às 15:00hs.
- Os desvios mais significativos entre η_{Exp} e η_{Teo} , ao longo dos 12 meses de monitoração, encontram-se nos meses de menores temperaturas experimentais de entrada nas placas solares (T_{epExp}). Esta condição minimiza as perdas térmicas das placas solares e maximiza a sua eficiência térmica, impactando diretamente na discrepância entre os modelos.
- De modo geral, a η_{Exp} registra valores maiores que a η_{Teo} em praticamente todos os meses do ano (acima de 15%), fato que se deve, em grande parte, à utilização de vazões volumétricas experimentais nas placas solares (\dot{V}_{psExp}) mais de 2 vezes superiores às indicadas no regulamento específico do PBE.
- O desvio percentual entre os valores de $PMEe_{Exp}$ e $PMEe_{Teo}$ foi menor que 4,0%. Apesar da boa concordância neste caso específico, as discrepâncias das variáveis utilizadas nos cálculos não permitem afirmar que esta estimativa possa ser válida para qualquer situação. A superioridade de I_T , quando comparada a G , para cálculo de $PMEe_{Teo}$, foi compensada pela superioridade de η_{Exp} , quando comparada a η_{Teo} , para

cálculo de PME_{Exp} . Portanto, não é possível afirmar que se este comportamento se repete de forma sistemática, até que testes adicionais sejam realizados.

- De modo geral, o volume do reservatório térmico (V_{rt}) mostrou-se bem dimensionado para o caso estudado, visto que nos meses de menor temperatura ambiente experimental (T_{ambExp}), o consumo de água quente (V_{aq}) representou mais de 2/3 do V_{rt} .
- A demanda mensal de energia (DME) representa, em média mensal, pouco mais de 1/3 da produção mensal de energia experimental (PME_{Exp}). Desta forma, conclui-se que as placas solares produzem uma quantidade muito maior de energia térmica que a demandada, mesmo nos períodos mais críticos (inverno).
- O consumo de energia elétrica (CEE) no sistema de aquecimento solar representa, em média mensal, pouco mais de 10% da demanda de energia térmica. Este valor se apresenta elevado em relação às expectativas iniciais.
- Em função do exposto sobre a PME_{Exp} e a CEE , em relação à DME , pode-se concluir que o sistema está desbalanceado do ponto de vista energético, uma vez que, a produção de energia térmica e o consumo de energia elétrica estão excessivos quando comparados a demanda de energia térmica. Ressalta-se que esta situação não é isolada e, portanto, se repete na maioria dos sistemas de aquecimento solar residencial, por circulação forçada.
- O consumo de energia elétrica (CEE) no sistema de aquecimento solar representa, em média mensal, menos que 5% da produção mensal de energia experimental (PME_{Exp}). Apesar disso, a questão deve ser tratada como um fator preponderante e analisada com critérios para definição do tipo de instalação a ser utilizada (circulação natural ou forçada).

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, novas possibilidades de estudos e análises foram surgindo, no sentido de complementar os resultados e dar condições de melhor entendimento dos fenômenos térmicos e o real impacto das variáveis em estudo no resultado global. Diante disto, foi proposto os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Analisar os resultados de eficiência térmica em um sistema de aquecimento solar cujas placas solares estão associadas em paralelo;

- Analisar os resultados de eficiência térmica em um sistema de aquecimento solar cuja vazão volumétrica nas placas solares é rigorosamente controlada e conforme regulamento específico do PBE;
- Analisar os resultados da eficiência térmica em um sistema de aquecimento solar cujas placas operam em circulação natural;
- Repetir o referido trabalho em uma instalação de grande porte, analisando e comparando os resultados.
- Analisar, de forma efetiva, a correlação entre o uso das vazões de operação superiores à recomendada no regulamento específico do PBE e a eficiência térmica das placas solares.

CAPITULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ammari, H.D., Nimir, Y.L., Experimental and theoretical evaluation of the performance of a flat plate solar water heater. *Energy Conversion and Management*, v. 44, pp. 3037–3055, 2003.
- Ananth, J., Jaisankar, S., Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heating system fitted with regularly spaced twisted tape with rod and spacer. *Energy Conversion and Management*, v. 73, pp. 207–213, 2013.
- ANSI/ASHRAE Standard 93-2003 - Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors.
- Benett, I. , Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States, *Solar Energy*, 1965.
- Borgnakke, C. e Sonntag, R.E., *Fundamentos da Termodinâmica*, 7ª Ed., Editora Edgard Blucher, 2010.
- Collares – Pereira, M., Rabl, A. The average Distribution of Solar Radiation – Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation, *Solar Energy*, V.22, p. 155, 1979.
- DNMET – Departamento Nacional de Metrologia. Normas Climatológicas: 1961 – 1990, Brasília 1992.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- EPE – Empresa de Estudo de Energia – Série Estudos de Demanda de Energia, Nota Técnica DEA 13/14, Demanda de Energia 2050, Rio de Janeiro, Agosto de 2014, EPE, Ministério de Minas e Energia.
- Fischer, S., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Perers, B., Bergquist, P., Hellström, B., Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2. *Solar Energy*, v. 76, pp. 117–123, 2004.
- García, A., Martin, R.H., Pérez-García, J., Experimental study of heat transfer enhancement in a flat-plate solar water collector with wire-coil inserts. *Applied Thermal Engineering*, v. 61, pp. 461–468, 2013.
- Ghazi, S.; Sayigh, A.; Ip, K. Dust effect on flat surfaces – A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 33, p. 742–751, maio 2014.

- Guimarães, A. P.C., Estudo Solarimétrico com Base na Definição de Mês Padrão e Sequência de Radiação Diária, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, 1995.
- Hussein, H.M.S., Mohamad, M.A., El-Asfour, A.S., Transient investigation of a thermosyphon flat-plate solar collector. *Applied Thermal Engineering*, v. 19, pp. 789–800, 1999.
- Incropera, F.P.; Dewitt, D.P.; Bergman, T.L. e Lavine, A.S., *Fundamentos de Transferência de Calor*, 6a Ed., Editora LTC, 2008.
- Jaisankar, S., Radhakrishnan, T.K., Sheeba, K.N., Suresh, S., Experimental investigation of heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of Left–Right twisted tapes. *Energy Conversion and Management*, v. 50, pp. 2638–2649, 2009.
- Holman, J. *Experimental Methods for Engineers*. 8 edition, Boston: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2011.
- Kalogirou, S.A., Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system. *Renewable Energy*, v. 12, pp. 179–192, 2012.
- Khalifa, A.-J.N., Thermal performance of locally made flat plate solar collectors used as part of a domestic hot water system. *Energy Conversion and Management*, v. 40, pp. 1825–1833, 1999.
- Liu, B.H., Jordan, R. C. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, *Solar Energy*, V.4, N3 1960.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1977. Availability of solar energy for flat plate solar heat collectors. In: Liu, B.Y.H., Jordan, R.C. (Eds.) *Application of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*. ASHRAE, Atlanta.
- Nunes, G. S. de S. Um método numérico para o cálculo de radiação infravermelha na atmosfera. São José dos Campos: INPE, 1976.
- Page, J. K. The estimation of monthly ea values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. *Proceedings of the UN conference on new sources of energy*. Anais... In: *Un Conference on New Sources of Energy*. 1964
- Pereira, E. M. D. Comparação entre Modelos que Estimam a Componente Difusa da Radiação Global a partir de Valores Médios em Januária (MG). II Encontro Ibero-Americano de Solarimetria. *Anais: II Encontro Ibero – Americano de Solarimetria*. 1991.

- Pereira, E. M. D. et al, Curso de Capacitação em Energia Solar – Manual do Professor, Rede Brasil de Capacitação, Projeto Sol Brasil, 2010.
- Regulamento Específico para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) – Sistema e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água, revisão 9 (2007).
- Revista Sol Brasil, Edição Jan/Jun 2016, nº 30, DASOL – Departamento Nacional de Energia Solar Térmica da ABRAVA – Associação Brasileira de Ar Condicionado Ventilação e Aquecimento.
- Sarver, T.; Al-Qaraghuli, A.; Kazmerski, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 698–733, jun. 2013.
- SHC – Solar Heating and Cooling Programme, IEA – International Energy Agency. *Solar Heat Worldwide Markets and Contribution to the Energy Supply 2014*. 2016 Edition
- Taherian, H., Rezaei, A., Sadeghi, S., Ganji, D.D., Experimental validation of dynamic simulation of the flat plate collector in a closed thermosyphon solar water heater. *Energy Conversion and Management*, v. 52, pp. 301–307, 2011.
- Wojcicki, D.J., The application of the Typical Day Concept in flat plate solar collector models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, pp. 968–974, 2015.

ANEXO A – ÂNGULOS SOLARES

A.1 A Constante Solar – Gsc

A constante solar G_{sc} é a energia do Sol por unidade de tempo incidente por unidade de área em uma superfície normal à direção de propagação da radiação e fora da atmosfera da Terra. Para uma distância média entre a Terra e o Sol, seu valor mais atual, segundo Duffie e Beckmann (2006), é de 1367 W/m^2 . Este valor corresponde ao máximo teórico de incidência de radiação solar, pois é medida antes que ocorra qualquer tipo de atenuação por nuvens, aerossóis, poluição ou absorção pelos próprios elementos constituintes da atmosfera terrestre. No entanto, ao atravessar a atmosfera terrestre, condições climáticas e locais introduzem modificações na intensidade e espectro da radiação. Assim, a radiação solar global incidente, é decomposta em duas componentes:

Radiação solar direta: definida como a fração da radiação solar global que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer qualquer alteração em sua direção original.

Radiação solar difusa: refere-se ao componente da radiação solar global que, ao atravessar a atmosfera, é espalhada por aerossóis, poeira, ou mesmo, refletida pelos elementos constituintes dessa atmosfera. A parte da radiação que atinge o coletor proveniente da emissão e reflexão de sua vizinhança, caracterizada pela vegetação e construções civis, também é incluída em sua componente difusa, sendo comumente denominada albedo.

Além disso, conforme Duffie e Backmann (2006) e Incropera (2008), adotou-se as seguintes definições relacionadas a radiação:

Irradiância: Taxa pela qual a energia radiante incide sobre uma superfície por unidade de área, expressa com W/m^2 .

Irradiação: Energia radiante incidente por unidade de área em uma superfície, encontrada pela integração de irradiância ao longo de um tempo especificado, geralmente uma hora ou um dia. Expressa em J/m^2 .

A.2 Geometria Solar

A relação geométrica entre um plano de qualquer orientação particular em relação à Terra, a qualquer momento e a irradiação solar, isto é, a posição do sol em relação a esse plano, pode ser descrito em termos de vários ângulos agrupados no que denominamos geometria solar. A correta aplicação destes ângulos, permite prever um melhor aproveitamento do recurso solar e com isso garantir uma instalação com melhor funcionamento do sistema de aquecimento solar.

A.2.1 Coordenadas Geográficas: Latitude, Longitude e Altitude

As coordenadas geográficas permitem a localização de um ponto sobre a superfície terrestre ou sua vizinhança, possibilitando calcular as grandezas envolvidas no estudo da geometria solar para a região específica de interesse.

Latitude Geográfica ϕ : corresponde à posição angular em relação à linha do Equador, considerada de latitude zero. Cada paralelo traçado em relação ao plano do Equador corresponde a uma latitude constante positiva, se traçada ao Norte e negativa, se posicionada ao sul do Equador. Os Trópicos de Câncer e de Capricórnio correspondem às latitudes de $23^{\circ} 27'$ ao Norte e ao Sul, respectivamente, compreendendo a região tropical, conforme Fig. A.1.

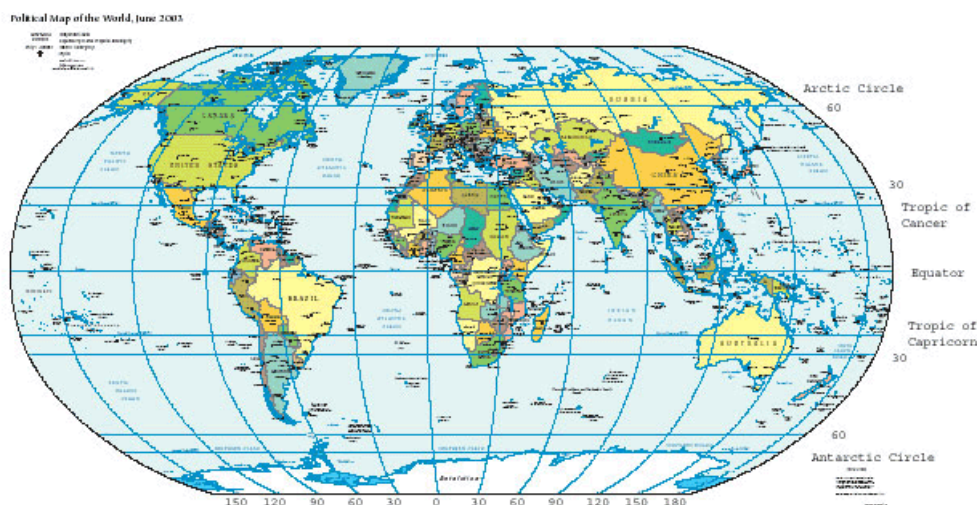


Figura A.1 – Latitude geográfica. Fonte: Contribuidores da Wikipédia.

Longitude geográfica L : é o ângulo medido ao longo do Equador da Terra, tendo origem no meridiano de Greenwich (referência) e extremidade no meridiano local. Na Conferência Internacional Meridiana foi definida sua variação de 0° a 180° (oeste de Greenwich) e de 0° a -180° (leste de Greenwich). A Longitude é muito importante da determinação dos fusos horários e da hora solar, conforme Fig. A.2.

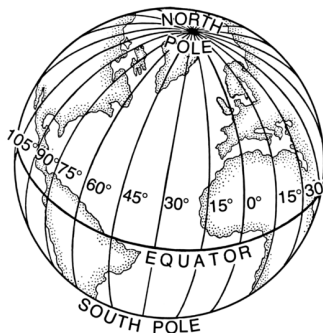


Figura A.2 – Longitude geográfica. Fonte: Contribuidores da Wikipédia.

Altitude Z : equivale à distância vertical medida entre o ponto de interesse e o nível médio do mar.

A.2.2 As Estações do Ano e o Ângulo de Declinação

Os movimentos da Terra, mostrados nas Fig. A.3 e Fig. A.4 respectivamente, podem ser sucintamente descritos como:

- Movimento de rotação em torno de seu próprio eixo, com período de 24 horas;



Figura A.3 – Movimento de rotação da Terra. Fonte: Pereira et al (2010).

- Movimento de translação em torno do Sol, em uma órbita elíptica cujo período orbital é de 365 dias.

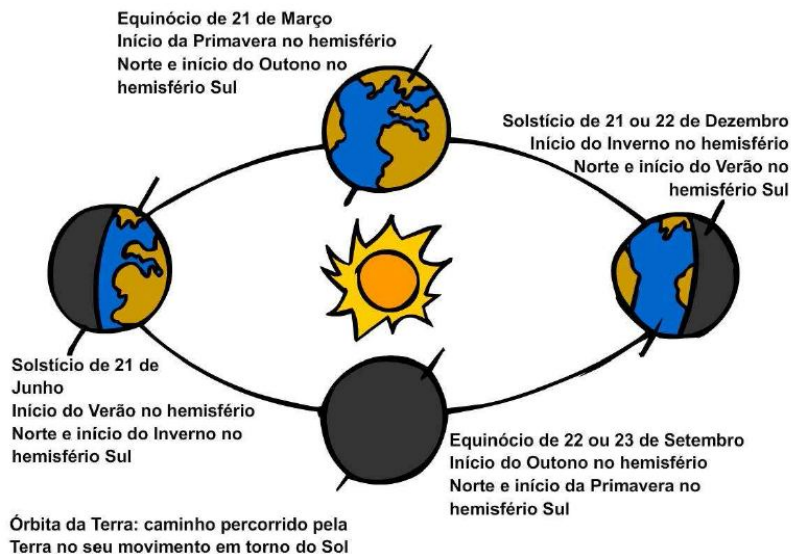


Figura A.4 – Movimento de translação da Terra. Fonte: Pereira et al (2010).

Como o eixo da Terra possui uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação a normal do plano da órbita terrestre, à medida que a Terra orbita em torno do Sol, os raios solares incidem mais diretamente em um hemisfério do que no outro, conforme a Fig. A.5. Assim, há verão com dias mais longos e inverno com dias de menor duração. Define-se assim, regiões e épocas do ano com maior nível de incidência da irradiação solar. No caso específico do Hemisfério Sul, são:

Solstício de Verão 21 ou 22 de Dezembro: O Sol encontra-se sobre o Trópico de Capricórnio, localização correspondente à cidade de São Paulo. Isto significa que neste dia as 12 horas, na cidade de São Paulo se tomarmos uma linha vertical sobre o observador, o ângulo que o raio solar faz com a linha vertical é zero. Para um observador instalado no Equador, este ângulo será de $23,45^\circ$ ao Sul.

Equinócio de Outono 21 de Março e Equinócio de Primavera 22 ou 23 de Setembro: Neste caso, em ambos os equinócios, o Sol encontra-se sobre o plano do Equador, correspondendo assim, a dias e noites iguais, com 12 horas de duração.

Solstício de Inverno 21 de Junho: O Sol encontra-se alinhado ao Trópico de Câncer, estando a $23,45^\circ$ a Norte, ao meio-dia solar, em relação a um observador no Equador.

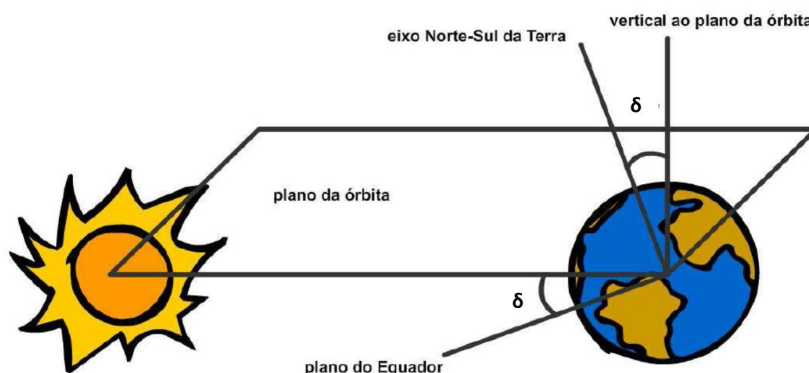


Figura A.5 – Órbita da Terra. Fonte: Pereira et al (2010).

Essas considerações podem ser resumidas pela avaliação do ângulo de declinação do Sol δ , definido como o ângulo de vértice no centro da Terra, formado pela semi-reta determinada pela direção do Sol e o plano do Equador ao meio dia solar. A declinação solar pode ser obtida pela equação de Cooper na forma:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot \frac{284 + d}{365}\right) \quad (\text{A.1})$$

Onde, d corresponde ao dia do ano, sendo igual uma unidade, em 1º de Janeiro. Portanto, o parâmetro d varia de 1 a 365.

A.2.3 Ângulos de Instalação Solar

Os ângulos da instalação solar estão associados à inclinação e orientação das placas solares.

Ângulo de inclinação da placa solar β : é o ângulo formado pelo plano inclinado da placa solar e o plano horizontal, conforme apresentado na Fig. A.6.

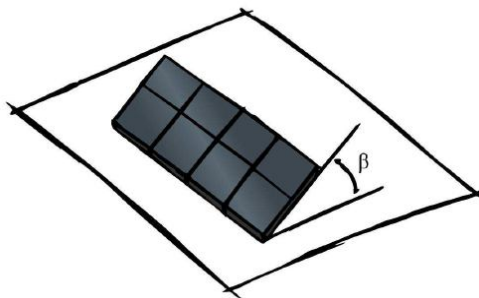


Figura A.6 – Ângulo de inclinação da placa solar. Fonte: Pereira et al (2010).

Importante ressaltar que a Geometria Solar exige que a inclinação esteja expressa em graus ou radianos, portanto é necessário cuidado especial para se evitar erros na comunicação dessa informação.

Ângulo azimutal de superfície γ : também denominado de ângulo de orientação da placa solar, corresponde ao ângulo formado entre a direção norte-sul e a projeção no plano horizontal da reta normal à superfície da placa solar e medido a partir do Sul ($\gamma = 0$). Seu valor varia na faixa ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$) de acordo com a convenção mostrada, conforme mostrado na Fig. A.7.

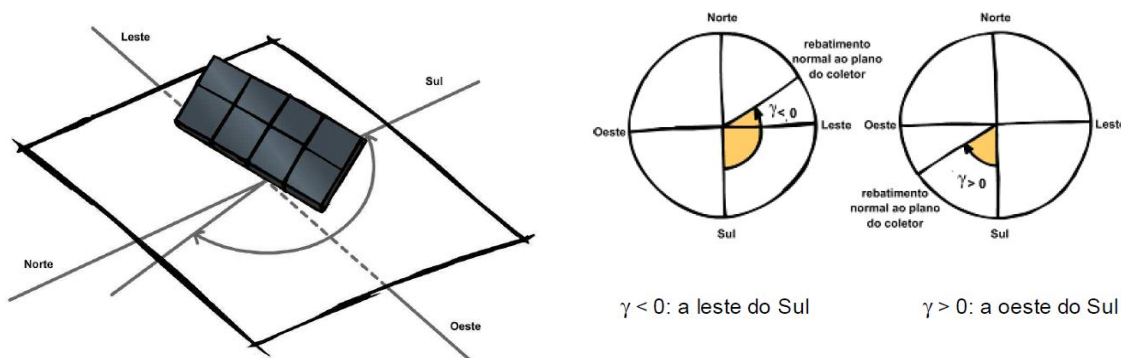


Figura A.7 – Ângulo azimutal de superfície. Fonte: Pereira et al (2010).

A.2.4 Ângulos Solares

Os ângulos solares são fundamentais para o cálculo da estimativa da irradiação solar que chega ao plano da placa solar, além de permitir a avaliação prévia de eventuais problemas de sombreamento que podem ocorrer na obra em estudo. Esses ângulos são: ângulo horário, zenital de altitude solar, ângulo azimutal do Sol e o ângulo de incidência da irradiação direta.

Ângulo horário ω : corresponde ao deslocamento angular do Sol em relação ao meridiano local devido ao movimento de rotação da Terra, mostrado na Fig. A.8. Esse deslocamento é de $15^\circ/\text{hora}$, visto que a Terra completa 360° em 24 horas. Ao meio dia solar o ângulo horário é nulo, os sinais positivo e negativo referem-se aos períodos da tarde e da manhã, respectivamente.

Ângulo zenital θ_z : é o ângulo formado entre a vertical a um observador local e o raio da componente direta da irradiação solar, mostrado na Fig. A.9. Quando o Sol está no zênite, ou seja, exatamente acima do observador. O ângulo zenital varia entre 0° e 90° , sendo calculado conforme a equação:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\phi + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\omega \quad (\text{A.2})$$

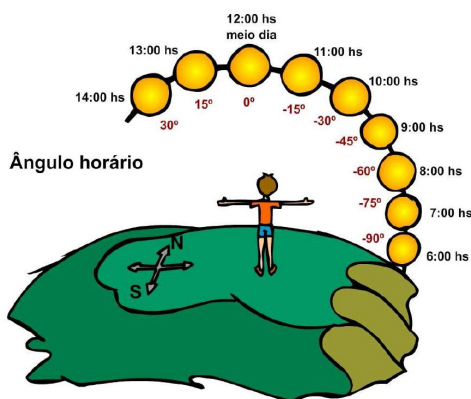


Figura A.8 – Ângulo horário. Fonte: Pereira et al (2010).

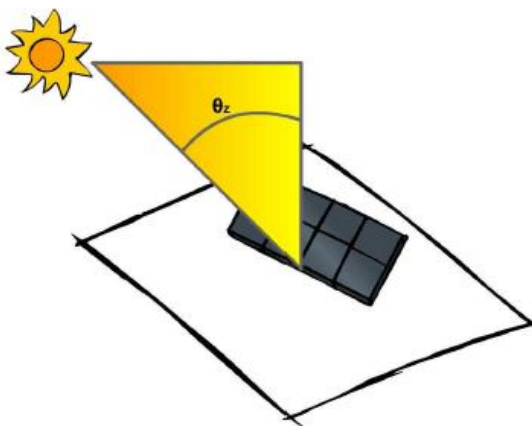


Figura A.9 – Ângulo zenital. Fonte: Pereira et al (2010).

Ângulo de altitude solar α_s : é o ângulo formado entre a horizontal e a direção do Sol, ou seja, o ângulo de altitude solar corresponde ao complemento do ângulo zenital, como mostra a Fig. A.10.

Ângulo de incidência da irradiação direta θ : é o ângulo formado entre a normal à uma determinada superfície e a reta determinada pela direção da irradiação solar direta, como representa a Fig. A.11, respectivamente. Sua variação acontece de $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, e pode ser calculado de acordo com a equação:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \beta - \text{sen} \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \varpi + \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varpi + \cos \delta \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} \varpi \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

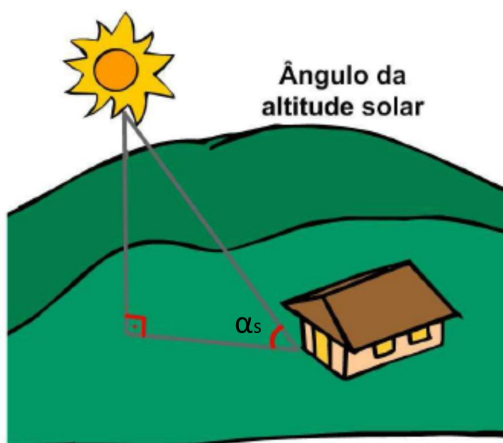


Figura A.10 – Ângulo de altitude solar. Fonte: Pereira et al (2010).

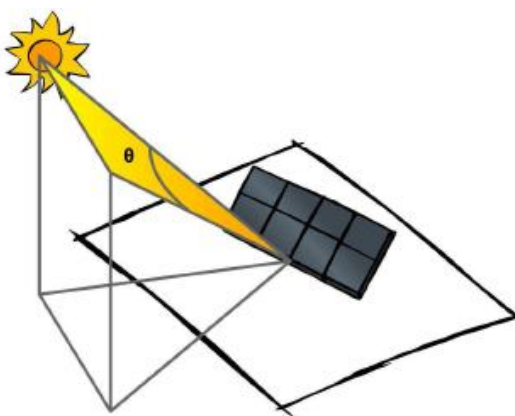


Figura A.11 – Ângulo de incidência da irradiação direta. Fonte: Pereira et al (2010).

ANEXO B – IRRADIAÇÃO SOLAR

B.1 Modelos de Estimativa de Irradiação Solar

Quando não se dispõe de medições de irradiação solar para determinada localidade, recomenda-se a utilização de métodos de estimativa dessa irradiação que, partindo de uma informação aparentemente limitada como o número de horas de brilho solar (n), permitam calcular as componentes direta e difusa da irradiação solar global, em média horária, diária e mensal para diferentes planos de inclinação e orientação das placas solares.

B.1.1 Irradiação Solar Global Diária em Média Mensal no Plano Horizontal

Os principais modelos propostos para a determinação da irradiação solar global diária, em média mensal, no plano horizontal, baseiam-se em relações empíricas, originadas a partir da equação de regressão tipo Angstrom, citada por Duffie e Beckman (2006), a saber:

$$\frac{\overline{H}}{H_c} = a + b \cdot \frac{\overline{n}}{N} \quad (\text{B.1})$$

Onde:

\overline{H} : Irradiação global diária média mensal em superfície horizontal.

$\overline{H_c}$: Irradiação global diária média mensal, em condições de céu claro, para a localidade e mês em questão.

a, b: Constantes empíricas que dependem da localidade e da estação do ano.

\overline{n} : número de horas de insolação diária mensal.

\overline{N} : Número teórico de horas de insolação diária média mensal. Pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$N = \frac{2}{15} a \cos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (\text{B.2})$$

Um novo modelo cuja diferença do original está na substituição da irradiação em dias claros $\overline{H_C}$, para a irradiação extraterrestre $\overline{H_o}$ incidente sobre uma superfície horizontal, foi proposto por Page et al (1964) obtendo-se, assim, a chamada equação modificada de Angstrom:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H_o}} = a + b \cdot \frac{\overline{n}}{N} \quad (\text{B.3})$$

Para determinação de $\overline{H_o}$ utiliza-se a expressão:

$$\overline{H_o} = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,33 \cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \right] \cdot (\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + \omega_s \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta) \quad (\text{B.4})$$

B.1.2 Modelo de Bennett

Bennet (1965) formulou um novo modelo, aplicado com grande sucesso no Hemisfério Norte que considera, além dos efeitos de duração do brilho solar e da irradiação extraterrestre, os efeitos relativos à altitude local e época do ano. Sua equação é expressa por:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H_o}} = a + b \cdot \frac{\overline{n}}{N} + ch \quad (\text{B.5})$$

Onde:

h: altitude da estação (medida em quilómetros).

a, b, c: coeficientes empíricos determinados a partir de dados observados.

Para o desenvolvimento do modelo de Bennett, foram utilizadas informações solarimétricas sobre 41 estações meteorológicas norte-americanas distribuídas entre as latitudes de 25°48' N a 48°11" N para altitudes de 0 a 2066 metros.

Nunes et al. (1976) adaptaram este modelo para o Hemisfério Sul e validaram os resultados para as cidades de Cabrobó – PE e Piracicaba – SP. O mesmo procedimento foi adotado por Pereira (1991) para Belo Horizonte e Januária, ambas em Minas Gerais. Em todos os casos levantados, os desvios de medição são inferiores a 5%, ou seja, ordem de grandeza da incerteza dos instrumentos de medição normalmente utilizados. Na Tab. B-1, estão relacionados os coeficientes empíricos da correlação de Bennet, adaptados para o Hemisfério Sul.

Tabela B-1 - Coeficientes empíricos da correlação de Bennet. Fonte: Pereira et al (2010).

Mês	a	b	c
Janeiro	0.225	0.4812	0,0007
Fevereiro	0.221	0.5026	0,0006
Março	0.221	0.5142	0,0005
Abril	0.188	0.5574	0,0005
Mai	0.197	0.5423	0,0004
Junho	0.235	0.4780	0,0004
Julho	0.264	0.4386	0,0004
Agosto	0.291	0.3768	0,0006
Setembro	0.260	0.4242	0,0006
Outubro	0.235	0.4744	0,0005
Novembro	0.207	0.4816	0,0007
Dezembro	0.237	0.4343	0,0007

B.1.3 Métodos de Estimativa da Irradiação Solar Direta e Difusa em Média Mensal

Modelos mais comuns para decompor a irradiação solar em suas componentes direta e difusa baseiam-se no índice de claridade em média mensal $\overline{K_T}$, definido pela equação:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (\text{B.6})$$

Onde: \bar{H} é a irradiação global diária média mensal e \bar{H}_0 é a irradiação extraterrestre, ambas incidentes em superfície horizontal e já definidas anteriormente.

Liu e Jordan (1960) propusera a equação que se segue para cálculo da componente difusa em média mensal, baseado no índice de claridade em média mensal.

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,390 - 4,027(\bar{K}_T) + 5,531(\bar{K}_T)^2 - 3,108(\bar{K}_T)^3 \quad (\text{B.7})$$

Neste caso, a componente mensal da irradiação direta é calculada simplesmente pela subtração da componente difusa da irradiação solar global.

B.1.4 Métodos de Estimativa de Irradiação Solar Direta e Difusa em Média Horária

Collares – Pereira e Rabl (1979) propuseram a distribuição temporal da irradiação global em superfícies horizontais a partir do parâmetro r_t , definido como a razão entre a irradiação solar em média horária (I) e diária (H). Assim,

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (\text{B.8})$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (\text{B.9})$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \text{sen}(\omega_s - 60) \quad (\text{B.10})$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \text{sen}(\omega_s - 60) \quad (\text{B.11})$$

Onde:

ω : hora angular

ω_s : hora angular correspondente ao pôr do sol

Para a estimativa da irradiação difusa em média horária, utilizamos uma expressão análoga, formulada por Liu e Jordan (1960), de modo que:

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} \quad (\text{B.12})$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (\text{B.13})$$

Para os referidos cálculos, é recomendado adotar como ângulo horário o valor referente à hora média do período de interesse.

B.1.5 Irradiação Global em Média Horária sobre Superfície Inclinada

O modelo proposto por Liu e Jordan (1977) considera que:

$$I_T = I_b R_b + I_b \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{B.14})$$

Onde:

I_T : média horária da irradiação global incidente em um plano com inclinação β .

I, I_b, I_d : irradiação global e suas componentes direta e difusa no plano horizontal, respectivamente.

ρ_g : reflectância da vizinhança para a irradiação difusa. A Tab. B-2 abaixo apresenta valores para diferentes materiais da construção civil.

Tabela B-2 - Valores de reflectância. Fonte: Pereira et al (2010).

Material	ρ_g
Terra	0,04
Tijolo Vermelho	0,27
Concreto	0,22
Gramma	0,2
Barro / Argila	0,14
Superfície Construção Clara	0,6

R_b : fator de correção geométrico para a irradiação direta, correspondente à razão entre os cossenos do ângulo de incidência da irradiação direta e o ângulo zenital, ou seja:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{B.15})$$

Os termos entre parêntese na Eq. B.14, correspondem a fatores geométricos associados à posição relativa entre o coletor e o céu em relação à vizinhança.

ANEXO C – ENSAIO DE EFICIÊNCIA TÉRMICA

C.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem – Eficiência Térmica Instantânea

O PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem, em seu regulamento específico para uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia, revisão 9 segue a norma americana ANSI/ASHRAE Standart 93 – 2003 para os cálculos de eficiência térmica instantânea e tem como premissa básica a condição de regime permanente ou quase permanente das variáveis.

C.1.1 Procedimento para Determinação de Rendimento Térmico da Placa Solar – Regime Quase Permanente

Condições para ensaio:

- Ângulo de incidência da irradiação solar direta inferior a 30°;
- Taxa de irradiação solar total incidente no plano da placa solar superior a 630 W/m²;
- Velocidade do vento durante no plano médio da placa solar inferior a 4,5 m/s;
- Vazão mássica igual a 0,02 kg/s por m² de área externa da placa solar;
- Regime quase permanente;

Para ser considerado regime quase permanente, é necessário que durante um intervalo de 10 minutos, sejam respeitadas as seguintes condições:

- Variação máxima da taxa de irradiação solar total incidente no plano da placa solar inferior a ± 50 W/m²;
- Variação máxima da temperatura de entrada da água da placa solar de 0,3°C;
- Variação máxima da temperatura do ar ambiente de 1°C;
- Variação máxima da vazão mássica da água na placa solar de 2%;
- Oscilação máxima da diferença de temperatura da água entre a entrada e saída da placa solar de 0,6°C;

Durante os primeiros 15 minutos de ensaio é necessário monitorar a variação da vazão mássica, de forma a garantir que a mesma esteja dentro dos limites permitidos.

O ensaio inicia-se com a temperatura da água na entrada da placa solar equivalente a temperatura ambiente. Após cada período de aquisição dos dados, a temperatura de entrada é elevada de 2°C até que seja atingida a temperatura máxima de ensaio de 60°C.

Após aquisição dos dados e término do ensaio, devem ser definidos no mínimo quatro agrupamentos de pontos diferentes e equidistantes de temperatura da água na entrada da placa solar para construção da curva de rendimento térmico. Sendo que o primeiro ponto deve ser igual ou variar no máximo 2°C da temperatura ambiente.

Para cada agrupamento de pontos de temperatura da água na entrada da placa solar, deve ser obtido no mínimo 4 medições, totalizando ao longo de todo ensaio um mínimo de 16 medições. Desta forma o ensaio deve iniciar as 10:00 hs, passar pelo meio dia solar (ângulo horário igual a 0°) e terminar as 14:00 hs.

O rendimento térmico da placa solar deve ser calculado pela Primeira Lei da Termodinâmica, conforme a equação:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep})}{G \cdot A_{ext}} \quad (C.1)$$

Onde;

η : eficiência térmica;

\dot{m} : vazão mássica expressão em kg/s;

c_p : Calor específico da água a pressão constante equivalente a 4,180 KJ/kg.°C;

T_{sp} : Temperatura de saída da água na placa solar, expressa em °C;

T_{ep} : Temperatura de entrada da água na placa solar, expressa em °C;

A_{ext} : Área externa da placa solar, expressa em m²;

G: Taxa de irradiação solar global incidente no plano da placa solar, expressa em W/m².

Contudo o cálculo do rendimento térmico, pela análise da Primeira Lei da Termodinâmica, não permite identificar pontos de otimização no projeto construtivo da placa solar. Em função disto, faz-se uso do Método das Perdas, possível de ser determinada experimentalmente, conforme a equação:

$$\eta = \frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \quad (C.2)$$

Onde;

A_u : Área útil da placa solar, em m²;

$F_R \tau\alpha$: Parâmetro adimensional referente aos ganhos térmicos da placa solar;

$F_R U_L$: Parâmetro referente as perdas térmicas da placa solar, W/m² °C;

T_{amb} : Temperatura ambiente, °C.

Desta forma, os diversos valores de rendimento térmico (η), calculados a partir dos pontos de medição através da Eq. C1, devem ser apresentados graficamente em função da Eq. C2.

Utilizando-se do método dos mínimos quadrados e ajustando-se os pontos de medição experimental a um polinômio de primeiro grau, chega-se a equação de rendimento térmico da placa solar, cujo formado é de uma reta, conforme a figura C.1.

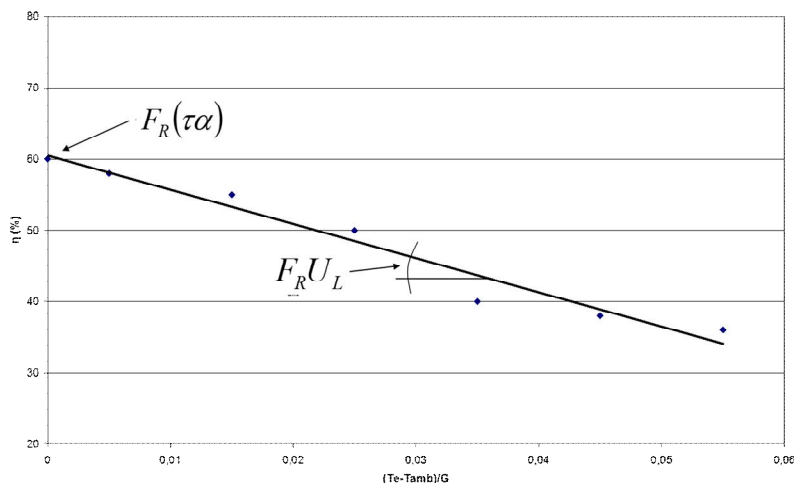


Figura C.1 – Curva de rendimento térmico da placa solar.

O coeficiente angular da reta é equivalente ao termo “ $F_R U_L$ ” e tem relação direta com as perdas térmicas da placa solar. O ponto onde a reta cruza o eixo “y” é equivalente ao termo “ $F_R(\tau\alpha)$ ”, que tem relação direta com os ganhos térmicos da placa solar. Assim é possível identificar oportunidades de otimização no projeto do produto avaliando o coeficiente angular da reta e o ponto onde a mesma cruza o eixo vertical. Além disso, é importante que cada ponto de ensaio esteja acompanhado de seu respectivo desvio padrão.

C.1.2 Procedimento para Determinação de Fator de Correção do Ângulo de Incidência – Regime Quase Permanente

O procedimento de ensaio também foi desenvolvido baseado na norma americana ANSI/ASHRAE 93 2003 e tem o objetivo de mensurar a influência do ângulo de incidência da irradiação direta sobre a transmissividade, τ , do vidro da placa solar. Condições para ensaio:

- Ângulo de incidência da irradiação solar direta variando entre 60° a 0°;
- Velocidade do vento durante no plano médio da placa solar inferior a 4,5 m/s;
- Vazão mássica igual a 0,02kg/s por m² de área externa da placa solar;
- Diferença entre a temperatura de entrada da água na placa solar e a temperatura ambiente menor que 1°C;
- Regime quase permanente;

O ensaio deve acontecer, no mínimo, para quatro valores de ângulo de incidência equivalentes a 0°, 30°, 45° e 60° com variação máxima de $\pm 4^\circ$. Contudo, é adotado para este ensaio a medição de 4 pontos a cada 15 minutos de forma simétrica, ou seja, antes e depois do meio dia solar. Para que o período de ensaio possa ser considerado regime quase permanente deve ser respeitado as seguintes condições:

- Variação máxima da taxa de irradiação solar total incidente no plano da placa solar inferior a ± 50 W/m²;
- Variação máxima da temperatura de entrada da água da placa solar de 0,3°C;
- Variação máxima da temperatura do ar ambiente de 1°C;

- Variação máxima da vazão mássica da água na placa solar de 2%;
- Oscilação máxima da diferença de temperatura da água entre a entrada e saída da placa solar de 0,6°C;

O rendimento térmico da placa solar é calculado para cada ângulo de incidência também pela Primeira Lei da Termodinâmica, conforme Eq. C1.

O Fator de Correção do Ângulo de Incidência é definido como a razão entre o rendimento térmico da placa solar medido para um determinado ângulo de incidência e o valor máximo do rendimento quando o ângulo de incidência é igual a 0°, conforme equação abaixo.

$$K_{\tau\alpha} = \frac{\eta(\theta)}{\eta(\theta = 0)} \quad (\text{C.3})$$

Onde;

$K_{\tau\alpha}(\theta)$: Fator de correção do ângulo de incidência para ângulo igual a θ .

$\eta(\theta)$: Rendimento térmico da placa solar para ângulo de incidência igual a θ .

$\eta(\theta = 0)$: Rendimento térmico da placa solar para ângulo de incidência igual a 0°.

Desta forma, os diversos valores de K calculados a partir dos pontos de medição, através da equação C.1, devem ser apresentados graficamente em função da expressão:

$$K_{\tau\alpha} = a + b \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (\text{C.4})$$

e, desta forma, tem-se uma reta conforme a Fig. C.2.

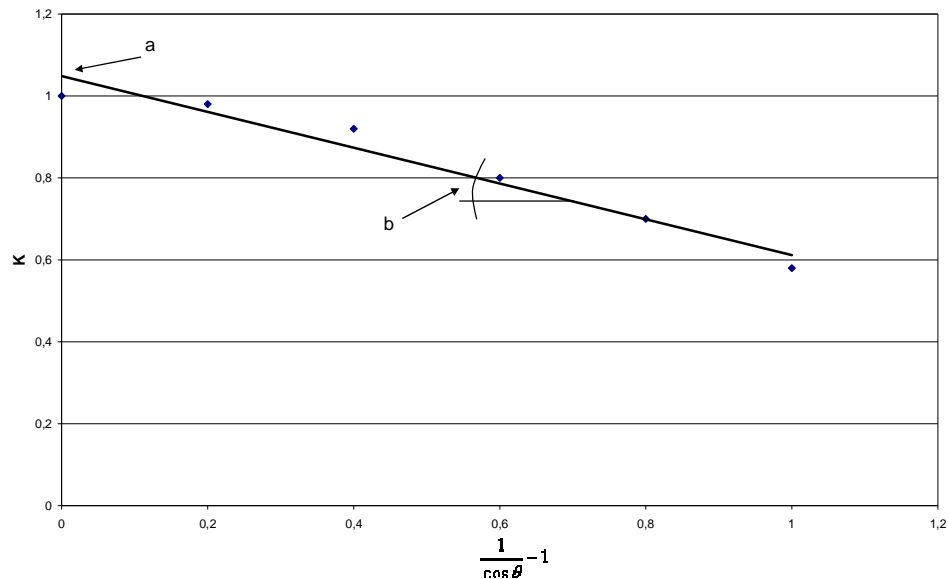


Figura C.2 – Curva do fator de correção do ângulo de incidência da placa solar.

O coeficiente angular da reta é equivalente ao termo “b” da Eq. C.4 e o ponto onde a reta cruza o eixo “y” é aproximadamente igual a 1 e equivalente ao termo “a” da Eq. C.4.

Em seguida o fator de correção do ângulo de incidência deve ser aplicado à Eq. C2 corrigindo o termo “ $\tau\alpha$ ” e conseqüentemente, o valor do rendimento térmico da placa solar para ângulos de incidência superiores a 30°. Além disso, é importante que cada ponto de ensaio esteja acompanhado de seu respectivo desvio padrão.

$$\eta = \frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ K_{\tau\alpha} F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \quad (C.5)$$

C.1.3 Produção Mensal de Energia

O Programa Brasileiro de Etiquetagem – INMETRO, entende que para a sociedade é importante que a etiqueta de conservação de energia ofereça informação sobre a produção mensal de energia de cada placa solar ensaiada. Daí a popularização do termo *PME*, Produção Mensal de Energia, cuja unidade adotada é “kWh/mês”. O termo *PMEe*, Produção Mensal de Energia específica, expresso em “kWh/mês.m²” também se popularizou no mercado por permitir a comparação de diferentes placas solares, independentemente de sua dimensão.

Sendo assim, para cálculo da *PME* e *PMEe* respectivamente, definiu-se como “*dia padrão*”, o mês de setembro para a cidade de Belo Horizonte, considerando a inclinação dos coletores igual a 25°. Esta metodologia é similar à adotada pelo Florida Energy Center (FSEC–GP-6-80) e apresentada na Tab. C-1.

A energia produzida pela placa solar durante uma hora, equivale ao produto de sua eficiência térmica pela energia incidente no plano da placa neste mesmo período de tempo. A soma dos valores horários para as “*i*” horas do dia, com nível satisfatório de radiação solar, fornece a produção diária de energia, *Pdia*. No caso do PBE, o índice *i* varia de 1 a 9. O valor diário é multiplicado por *Nd* (número de dias do mês) para obtenção da energia gerada durante um mês, *PME*:

$$PME = \frac{Nd}{1000} \sum_{i=1}^{i=n} \eta \cdot (G \cdot A_{ext}) \quad (C.6)$$

A constante 1000 é apenas para conversão da unidade “Wh/mês” em “kWh/mês”. Isto permite uma melhor avaliação, por parte dos consumidores finais, da economia de energia a ser obtida com a utilização do aquecimento solar, sobretudo quando comparado ao chuveiro elétrico. Para cálculo da *PMEe*, basta que não seja considerado na Eq. C.6 a área externa da placa solar.

Tabela C-1 – Dia padrão. Fonte: Regulamento Específico para Uso da ENCE (2007).

Tabela Dia Padrão – Aplicação BANHO

Hora	T _{amb} (°C)	G _{direta} (W/m ²)	G _{difusa} (W/m ²)	G _{total} (W/m ²)	θ	T _{fe} (°C)
08:01 a 09:00	20,3	243,67	139,66	383,33	52,6	32
09:01 a 10:00	21,7	361,66	183,77	545,43	37,8	34
10:01 a 11:00	23,1	457,55	215,19	672,74	23,2	36
11:01 a 12:00	24,5	511,24	231,52	742,76	9,5	38
12:01 a 13:00	25,6	511,24	231,52	742,76	9,5	40
13:01 a 14:00	26,5	457,55	215,19	672,74	23,2	40
14:01 a 15:00	27,0	361,66	183,77	545,43	37,8	40
15:01 a 16:00	27,2	243,67	139,66	383,33	52,6	38
16:01 a 17:00	27,0	127,26	86,12	213,38	67,4	36

ANEXO D – CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A Primeira Lei da Termodinâmica, conforme Borgnakke e Sontag (2010), para um volume de controle, tem-se:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \quad (D.1)$$

Com base nas hipóteses de Regime Permanente, tem-se:

1. O volume de controle não se move em relação ao sistema de coordenadas. Isto significa que todas as velocidades medidas são também velocidades relativas à superfície de controle e não há trabalho associado com a aceleração do volume de controle.
2. O estado da substância, no caso a água, em cada ponto do volume de controle, não varia com o tempo.
3. O fluxo de massa e o estado dessa massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não varia como tempo. As taxas com as quais o calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes. Logo, tem-se:

$$\frac{dm_{v.c.}}{dt} = 0 \quad (D.2)$$

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = 0 \quad (D.3)$$

Portanto para o processo em regime permanente:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (D.4)$$

$$\dot{Q}_{V.C.} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) + \dot{W}_{V.C.} \quad (D.5)$$

4. A hipótese de que as várias vazões, estados e taxas, com as quais calor e trabalho atravessam a superfície de controle, permanecem constante significa que a vazão mássica de entrada e saída são constantes e independente do tempo.

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \quad (D.6)$$

$$\dot{Q}_{V.C.} + \dot{m} \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \dot{m} \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) + \dot{W}_{V.C.} \quad (D.7)$$

Voltando na Eq. D.7 e adaptando-a para o volume de controle da placa solar, conforme Fig. 4.1, considera-se que:

- Variação de energia cinética é desprezível.
- Variação de energia potencial é desprezível.
- Taxa líquida de trabalho é nula.
- Energia útil no volume de controle fica: $\dot{Q}_{VC} = G \cdot A_{ext} - \dot{Q}_{Perdas} = \dot{Q}_u$

Diante destas considerações, temos que o método da Primeira Lei da Termodinâmica aplicado a placa solar, a Eq. D.7 fica da seguinte forma:

$$\left(G \cdot A_{ext} - \dot{Q}_{Perdas} \right) + \dot{m} h_e = \dot{m} h_s$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m} (h_s - h_e) \quad \text{e para líquidos, } h_s - h_e \approx c_p (T_{sp} - T_{ep})$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_{sp} - T_{ep}) \quad (D.8)$$

Para o caso da placa solar, podemos escrever a equação de eficiência térmica como sendo a razão entre a taxa de transferência de calor para a água (calor útil) e a taxa de energia solar incidente no plano da placa solar, ou seja:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u \text{ (energia pretendida)}}{G.A_{ext} \text{ (energia disponível)}} \quad (\text{D.9})$$

$$\eta = \frac{\dot{m}.c_p.(T_{sp} - T_{ep})}{G.A_{ext}} \quad (\text{D.10})$$

Onde;

η : eficiência térmica;

\dot{m} : vazão mássica expressão em kg/s;

c_p : Calor específico da água a pressão constante equivalente a 4,180 KJ/kg.°C;

T_{sp} : Temperatura de saída da água na placa solar, expressa em °C;

T_{ep} : Temperatura de entrada da água na placa solar, expressa em °C;

A_{ext} : Área externa da placa solar, expressa em m²;

G : Taxa de irradiação solar global incidente no plano da placa solar, expressa em W/m².

\dot{Q}_u : calor útil absorvido pela água, expresso em W.

É importante ressaltar que o cálculo da vazão mássica segue a seguinte equação:

$$\dot{m} = \rho.\dot{V} \quad (\text{D.11})$$

Onde;

ρ : densidade da água na temperatura de entrada da placa solar, expressa em kg/ m³;

\dot{V} : vazão volumétrica da água expressa em m³/s.

ANEXO E – EFICIÊNCIA TÉRMICA INSTANTÂNEA

O conceito de rendimento térmico da placa solar é definido como a razão entre a taxa de transferência de calor para a água (calor útil) e a taxa de energia solar incidente no plano da placa solar.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u(\text{energia pretendida})}{G.A_{ext}(\text{energia disponível})} \quad (\text{E.1})$$

Onde:

η : eficiência térmica;

\dot{Q}_u : calor útil absorvido pela água, expresso em W.

G : Taxa de irradiação solar global incidente no plano da placa solar, expressa em W/m².

A_{ext} : Área externa da placa solar, expressa em m²;

Além disso, é sabido que parte da irradiação solar total incidente na cobertura da placa solar é refletida pelo vidro, parte é absorvida pelo vidro e somente a parte transmitida pelo vidro chega até a placa absorvedora, conforme Fig. E.1.

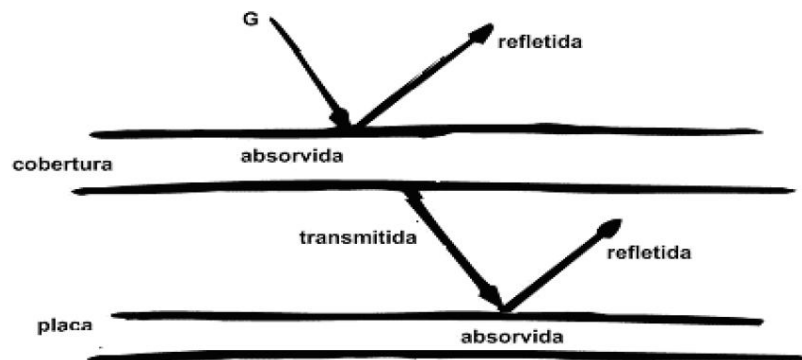


Figura E.1 – Irradiação solar incidente da placa solar. Fonte: Pereira et al (2010).

Desta energia, apenas a parte absorvida pela placa absorvedora é de fato responsável pelo aumento de sua temperatura, conforme a equação abaixo.

$$S = \tau \alpha . G \quad (\text{E.2})$$

Onde;

S : Taxa de energia incidente sobre a placa absorvedora, expressa em W/m^2 ;

τ : Transmissividade do vidro da placa solar, adimensional;

α : Absortividade da placa absorvedora, adimensional;

Diante disto é possível afirmar que:

$$A_u . S = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{perdas} \quad (\text{E.3})$$

Reescrevendo a equação anterior;

$$\dot{Q}_u = A_u . S - \dot{Q}_{perdas} \quad (\text{E.4})$$

Onde;

\dot{Q}_{perdas} : Perdas térmicas pelo topo, base e lateral da placa solar, expressa em W ;

A_u : Área útil da placa solar ou área transparente, expressa em m^2 ;

Admitindo que a placa absorvedora tenha uma temperatura T_p e que o ambiente esteja a uma temperatura T_{amb} , as perdas térmicas da placa solar podem ser calculadas da seguinte forma.

$$\dot{Q}_{perdas} = U_L A_u (T_p - T_{amb}) \quad (\text{E.5})$$

Onde;

U_L : Coeficiente global de perdas térmicas da placa solar, expresso em $\text{W}/^\circ\text{C}$;

T_p : Temperatura na placa absorvedora, expressa em $^\circ\text{C}$;

T_{amb} : Temperatura do ar ambiente, expressa em °C;

Substituindo a equação E.5 na equação E.4 e simplificando, tem-se:

$$\dot{Q}_u = A_u \{S - U_L (T_p - T_{amb})\} \quad (E.6)$$

Para cálculo do calor útil absorvido pela água, \dot{Q}_u , é necessário conhecer a temperatura da placa absorvedora, T_p . Contudo, esta variável é difícil de ser calculada ou medida. De acordo com Kalogirou (2012) e Duffie Backmann (2006), o calor útil pode ser expresso em função da temperatura de entrada da água na placa solar, T_{ep} , e um parâmetro conhecido como fator de remoção de calor da placa solar, F_r . Estimado por:

$$\dot{Q}_u = A_u F_R \{S - U_L (T_{ep} - T_{amb})\} \quad (E.7)$$

Onde;

F_r : Fator de remoção de calor da placa absorvedora para a água, adimensional;

Substituindo a Eq. E.2 na Eq. E.7 temos:

$$\dot{Q}_u = A_u F_R \left\{ (\tau\alpha)G - U_L (T_{ep} - T_{amb}) \right\} \quad (E.8)$$

E finalmente, substituindo a Eq. E.8 na Eq. E.1, tem-se a equação de rendimento térmico da placa solar com base no Método de Eficiência Térmica Instantânea ou Método das Perdas.

$$\eta = \frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \quad (E.9)$$

Onde;

A_u : Área útil da placa solar, em m²;

$F_R \tau \alpha$: Parâmetro adimensional referente aos ganhos térmicos da placa solar;

$F_R U_L$: Parâmetro referente as perdas térmicas da placa solar, W/m² °C;

T_{amb} : Temperatura ambiente, °C.

ANEXO F – PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

A análise dos dados experimentais se baseia no princípio de que, a partir de qualquer série de medidas, espera-se obter um conjunto de dados similar a uma curva de Gauss.

Para propagação de incertezas foi utilizada a metodologia mais comum, que calcula um valor RMS para as incertezas. Definindo o valor de “ w_R ” como sendo a incerteza resultante dos cálculos, segundo Holman (2011), ele pode ser expresso por:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{F.1})$$

É importante enfatizar ainda que, por se tratar de um valor RMS, os valores do cálculo não chegam exatamente no mesmo resultado que seria obtido utilizando os valores máximos e mínimos de cada componente, sempre que o sistema tem mais de um componente com incertezas.

Para o cálculo das incertezas de medida, o valor foi calculado com base nas análises estatísticas na forma:

$$\delta_a = \pm t \cdot \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}} \quad (\text{F.2})$$

Onde “ t ” representa o valor que efetivamente descarta a faixa considerada. Nota-se que o aumento do número de medidas ou a diminuição do nível de confiança desejada, reduzem o valor da incerteza.

O valor do “ t ” de Student pode ser obtido tanto por tabelas disponíveis na literatura estatística como através de pacotes computacionais, para o intervalo de confiança desejado.

F.1 Propagação das Incertezas das Medidas

Segue abaixo a incerteza da instrumentação utilizado no experimento.

- Temperatura (T): $\pm 1,5^\circ\text{C}$ para faixa de -50°C a 105°C (conforme fabricante);
- Vazão volumétrica placa solar ($\dot{V}_{ps\text{Exp}}$): $\pm 0,13$ l/min, conforme calibração no ANEXO G;
- Consumo água quente (V_{aq}): $\pm 0,13$ l, conforme calibração no ANEXO G;
- Radiação (G): $\pm 8,31$ W/m², conforme calibração no ANEXO G.

Em função da variação dos parâmetros ao longo do teste, apenas a incerteza do instrumento foi considerada.

F.2 Vazão volumétrica da placa solar

Considerações:

- t: Tempo para registro = 30 s;
- 60 = Fator de conversão de unidade de segundos para minutos.

$$\dot{V}_{ps\text{Exp}} = \frac{V_{ps\text{Exp}}}{t / 60}$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{V}_{ps\text{Exp}}} = \frac{\partial \dot{V}_{ps\text{Exp}}}{\partial V_{ps\text{Exp}}} = \frac{\partial \left(\frac{V_{ps\text{Exp}}}{t / 60} \right)}{\partial V_{ps\text{Exp}}} = \frac{60}{t} = \frac{60}{30} = 2$$

$$w_{\dot{V}_{ps\text{Exp}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial \dot{V}_{ps\text{Exp}}} \cdot w_{V_{ps\text{Exp}}} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{V}_{ps\text{Exp}}}{\partial V_{ps\text{Exp}}} \cdot w_{V_{ps\text{Exp}}} \right)^2} = \sqrt{(2 \cdot w_{V_{ps\text{Exp}}})^2}$$

$$w_{\dot{V}_{ps\text{Exp}}} = 2 \cdot w_{V_{ps\text{Exp}}} \quad (\text{F.3})$$

F.3 Taxa de calor útil absorvido pela água na placa solar:

Considerações:

- ρ = Massa específica da água = 990,10 kg/m³;
- C_p = Calor específico da água a pressão constante = 4,18 kJ/kg.°C.

$$\dot{Q}_u = \dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep})$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{V}_{ps\ Exp}} = \frac{\partial \dot{Q}_u}{\partial \dot{V}_{ps\ Exp}} = \frac{\partial [\dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep})]}{\partial \dot{V}_{ps\ Exp}} = \rho \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep})$$

$$\frac{\partial R}{\partial T_{sc}} = \frac{\partial \dot{Q}_u}{\partial T_{sc}} = \frac{\partial [\dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep})]}{\partial T_{sc}} = \dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p$$

$$\frac{\partial R}{\partial T_{ec}} = \frac{\partial \dot{Q}_u}{\partial T_{ec}} = \frac{\partial [\dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep})]}{\partial T_{ec}} = -\dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p$$

$$w_{\dot{Q}_u} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial \dot{V}_{ps\ Exp}} \cdot w_{\dot{V}_{ps\ Exp}} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_{sc}} \cdot w_{T_{sc}} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_{ec}} \cdot w_{T_{ec}} \right)^2} =$$

$$w_{\dot{Q}_u} = \sqrt{\left[\rho \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{ep}) \cdot w_{\dot{V}_{ps\ Exp}} \right]^2 + \left(\dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{sc}} \right)^2 + \left(-\dot{V}_{ps\ Exp} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{ec}} \right)^2} \quad (F.4)$$

F.4 Calor útil absorvido pela água na placa solar:

Considerações:

- t = tempo de registro de dados, igual a 30s.

$$Q_u = \dot{Q}_u \cdot t$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{Q}_u} = \frac{\partial Q_u}{\partial \dot{Q}_u} = \frac{\partial (\dot{Q}_u \cdot t)}{\partial \dot{Q}_u} = t = 30$$

$$w_{\dot{Q}_u} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial \dot{Q}_u} \cdot w_{\dot{Q}_u}\right)^2} = \sqrt{(30 \cdot w_{\dot{Q}_u})^2}$$

$$w_{\dot{Q}_u} = 30 \cdot w_{\dot{Q}_u} \quad (\text{F.5})$$

F.5 Eficiência térmica pelo Método da Primeira Lei da Termodinâmica:

Considerações:

- $A_{ext} = \text{Área externa} = 6,0 \text{ m}^2$.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G \cdot A_{ext}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{Q}_u} = \frac{\partial \eta}{\partial \dot{Q}_u} = \frac{\partial \left(\frac{\dot{Q}_u}{G \cdot A_{ext}} \right)}{\partial \dot{Q}_u} = \frac{1}{G \cdot A_{ext}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial G} = \frac{\partial \eta}{\partial G} = \frac{\partial \left(\frac{\dot{Q}_u}{G \cdot A_{ext}} \right)}{\partial G} = -\frac{\dot{Q}_u}{G^2 \cdot A_{ext}}$$

$$w_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial \dot{Q}_u} \cdot w_{\dot{Q}_u}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial G} \cdot w_G\right)^2}$$

$$w_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{1}{A_{ext} \cdot G} \cdot w_{\dot{Q}_u}\right)^2 + \left(-\frac{\dot{Q}_u}{A_{ext} \cdot G^2} \cdot w_G\right)^2} \quad (\text{F.6})$$

F.6 Eficiência térmica instantânea pelo Método das Perdas:

Considerações:

- $A_{ext} = \text{Área externa} = 6,0 \text{ m}^2$;
- $A_u = \text{Área útil} = 5,86 \text{ m}^2$;

- $K_{\tau\alpha}$ = fator de correção do ângulo de incidência;
- $F_R(\tau\alpha)$ = parâmetro adimensional referente aos ganhos térmicos da placa solar = 0,741;
- $F_R U_L$ = parâmetro adimensional referente as perdas térmicas da placa solar = 6,681.

$$\eta = \frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ K_{\tau\alpha} \cdot F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\}$$

$$\frac{\partial R}{\partial G} = \frac{\partial \eta}{\partial G} = \frac{\partial \left(\frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ K_{\tau\alpha} \cdot F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \right)}{\partial G} = \frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G^2} \right\}$$

$$\frac{\partial R}{\partial T_{ep}} = \frac{\partial \eta}{\partial T_{ep}} = \frac{\partial \left(\frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ K_{\tau\alpha} \cdot F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \right)}{\partial T_{ep}} = - \frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L}{G}$$

$$\frac{\partial R}{\partial T_{amb}} = \frac{\partial \eta}{\partial T_{amb}} = \frac{\partial \left(\frac{A_u}{A_{ext}} \left\{ K_{\tau\alpha} \cdot F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G} \right\} \right)}{\partial T_{amb}} = \frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L}{G}$$

$$w_\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial G} \cdot w_G \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_{ep}} \cdot w_{T_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_{amb}} \cdot w_{T_{amb}} \right)^2}$$

$$w_\eta = \sqrt{\left(\frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L (T_{ep} - T_{amb})}{G^2} \cdot w_G \right)^2 + \left(- \frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L}{G} \cdot w_{T_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{A_u}{A_{ext}} \cdot \frac{F_R U_L}{G} \cdot w_{T_{amb}} \right)^2} \quad (F.7)$$

F.7 - Taxa de calor útil produzida na placa solar pelo Método das Perdas:

Consideração:

- $\dot{Q}_u = G \cdot A_{ext} \cdot \eta \cdot 3,6$.

$$\frac{\partial R}{\partial G} = \frac{\partial \dot{Q}_u}{\partial G} = \frac{\partial (G \cdot A_{ext} \cdot \eta \cdot 3,6)}{\partial G} = A_{ext} \cdot \eta \cdot 3,6$$

$$\frac{\partial R}{\partial \eta} = \frac{\partial E_u}{\partial \eta} = \frac{\partial(G \cdot A_{ext} \cdot \eta \cdot 3,6)}{\partial \eta} = G \cdot A_{ext} \cdot 3,6$$

$$w_{\dot{Q}_u} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial G} \cdot w_G\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \eta} \cdot w_\eta\right)^2}$$

$$w_{\dot{Q}_u} = \sqrt{(A_{ext} \cdot \eta \cdot 3,6 \cdot w_G)^2 + (G \cdot A_{ext} \cdot 3,6 \cdot w_\eta)^2} \quad (F.8)$$

F.8 Energia térmica consumida:

$$DME = V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{aq} - T_{af})$$

$$\frac{\partial R}{\partial DME} = \frac{\partial DME}{\partial DME} = \frac{\partial[DME \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{aq} - T_{af})]}{\partial DME} = \rho \cdot c_p \cdot (T_{aq} - T_{af})$$

$$\frac{\partial R}{\partial T_{aq}} = \frac{\partial DME}{\partial T_{aq}} = \frac{\partial[V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{aq} - T_{af})]}{\partial T_{aq}} = V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p$$

$$\frac{\partial R}{\partial T_{af}} = \frac{\partial DME}{\partial T_{af}} = \frac{\partial[V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{aq} - T_{af})]}{\partial T_{af}} = -V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p$$

$$w_{DME} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V_{aq}} \cdot w_{V_{aq}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_{aq}} \cdot w_{T_{aq}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_{af}} \cdot w_{T_{af}}\right)^2} =$$

$$w_{DME} = \sqrt{[\rho \cdot c_p \cdot (T_{aq} - T_{af}) \cdot w_{V_{aq}}]^2 + (V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{aq}})^2 + (-V_{aq} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w_{T_{af}})^2} \quad (F.9)$$

ANEXO G – CALIBRAÇÃO INSTRUMENTAÇÃO

G.1 - Calibração da Instrumentação

A calibração do piranômetro foi realizada a partir do piranômetro de referência da marca Kipp Zonen, modelo CMP22, utilizado em simulador solar e gentilmente cedido pelo Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento do IPT em São Paulo SP, conforme Fig. G.1.

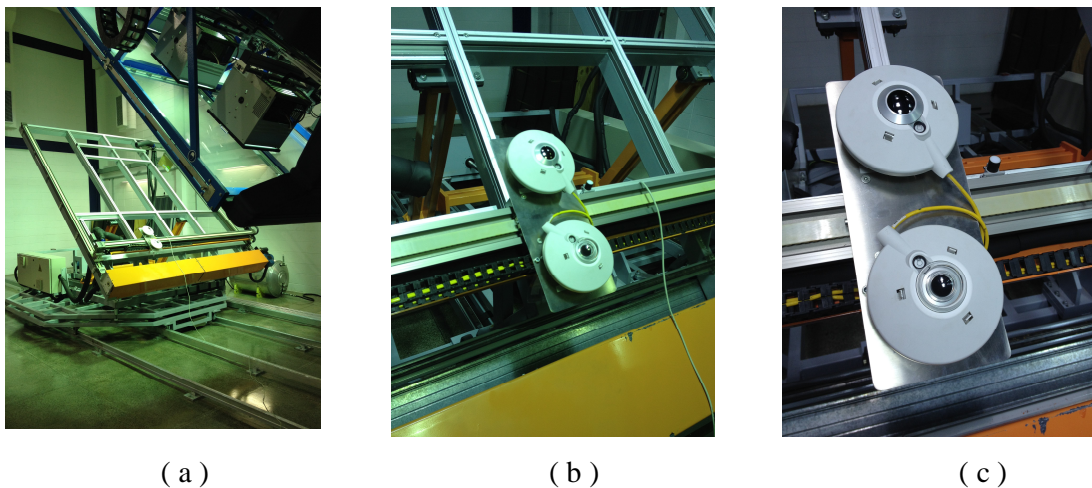


Figura G.1 – Calibração do piranômetro.

A Tab. G-1 apresenta os dados amostrais registrados no piranômetro do experimento e piranômetro de referência do IPT, assim com os dados gerados pela equação de calibração, respectivamente.

Tabela G-1 – Calibração do piranômetro.

Amostra	G Experimento [W/m ²]	G IPT [W/m ²]	G Equação [W/m ²]	Desvio Quadrático
1	583,64	589,00	605,24	263,92
2	511,82	537,00	542,19	26,93
3	577,27	606,00	599,66	40,22
4	690,00	708,00	698,63	87,74
5	795,45	804,00	791,22	163,28
6	923,64	891,00	903,76	162,96
7	945,45	920,00	922,92	8,54
8	704,00	700,00	710,92	119,35
9	578,00	610,00	600,29	94,15
10	916,00	918,00	897,06	438,45
11	965,00	929,00	940,08	122,83

A Fig. G.2 apresenta a curva de calibração do piranômetro.

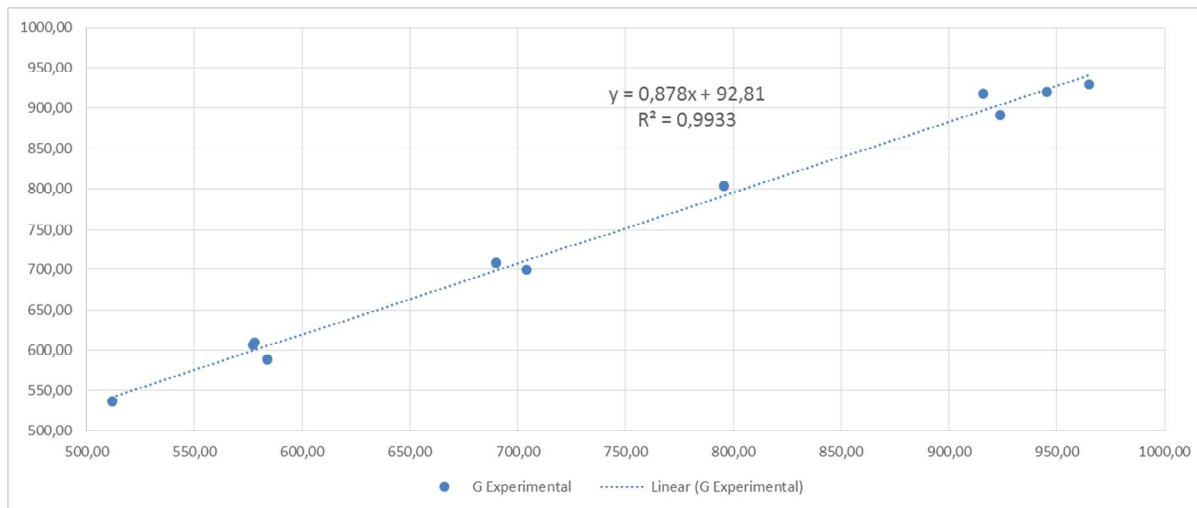


Figura G.2 – Curva de calibração do piranômetro.

Com base nos dados de calibração, número de dados e desvio quadrático foi possível calcular a incerteza do instrumento conforme Tab. G-2.

Tabela G-2 – Incerteza do piranômetro.

Média (G Equação - G IPT)	0,00
Número Dados	11,00
Graus Liberdade	10,00
Intervalo Confiança	0,95
Nível Confiança	0,05
Distribuição t	2,23
Desvio Padrão	12,36
Incerteza (\pm)	8,31 W/m²

Quanto ao medidor de vazão, primeiramente foi necessário construir o algoritmo, em linguagem de programação C. Este programa foi gravado na placa controladora de plataforma aberta tipo Arduino, modelo V2.1, alimentação 5 Vcc (Conversor Digital / Analógico). O programa gravado permite receber a informação em sinal digital, na forma de pulso e a converter em um sinal analógico proporciona de tensão de 0 a 5 Vcc. Este sinal analógico é reconhecido pelo expensor de dados MOD 64, que conectado ao CONV32, permite a transmissão e armazenagem de dados, pelo Sitrad, no computador. As Figs. G.3 e G.4 apresentam os algoritmos programados para os medidores de vazão para placas solares e consumo de água quente, respectivamente.


```

void loop ()
{
  NbTopsFan = 0; //Set NbTops to 0 ready for calculations

  sei(); //Enables interrupts
  delay (15000); //Wait 15 second
  cli(); //Disable interrupts
  Calc = (2.0*NbTopsFan/5.5/60.0); //(Num pulsos /8.15/60) =
volume no tempo
  //nlitros = Calc;
  //Serial.print (nlitros, DEC); //Prints the number calculated
above
  //Serial.print (" L"); //Prints "L" and returns a new line
  //Serial.print (Calc); //Prints the number calculated above

  // Ajustando uma saida proporcional

  // map it to the range of the analog out:
  outputValue = map(Calc, 0, 10, 1, 255);
  // change the analog out value:
  analogWrite(analogOutPin, outputValue);

  //Serial.print (" - "); //Prints "L/hour" and returns a new
line
  //Serial.println(outputValue);
  //Serial.print ("\r\n"); //Prints "L/hour" and returns a new
line
}

```

Figura G.3 – Algoritmo de conversão de dados digitais em analógicos placas solares.

```

void loop ()
{
  NbTopsFan = 0; //Set NbTops to 0 ready for calculations

  sei(); //Enables interrupts
  delay (15000); //Wait 15 second
  cli(); //Disable interrupts
  Calcold= Calc;
  Calc = (NbTopsFan*0.25*0.8); //(Pulse frequency x 60) / 73, =
flow rate in L/hour
  nlitros = (Calc+Calcold);
  Serial.print (NbTopsFan); //Prints the number calculated above
  Serial.print (" pulsos em 15s - "); //Prints "L" and returns a
new line
  Serial.print (nlitros ); //Prints the number calculated above
  Serial.print (" L em 30s"); //Prints "L" and returns a new
line
  //Serial.print (NbTopsFan); //Prints the number calculated
above

  // Ajustando uma saida proporcional

  // map it to the range of the analog out:
  outputValue = map(nlitros*10, 0, 100, 1, 255);
  // change the analog out value:
  analogWrite(analogOutPin, outputValue);

  Serial.print (" - "); //Prints "L/hour" and returns a new
line
  Serial.println(outputValue);
  //Serial.print ("\r\n"); //Prints "L/hour" and returns a new
line
}

```

Figura G.4 – Algoritmo de conversão de dados digitais em analógicos p/ consumo de água quente.

A calibração do medidor de vazão volumétrica foi feita no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNESP Bauru. A vazão volumétrica de referência adotada foi medida através de um balde graduado e um cronômetro, sempre em comparação a medida registra no medidor de vazão, conforme a Fig. G.5.

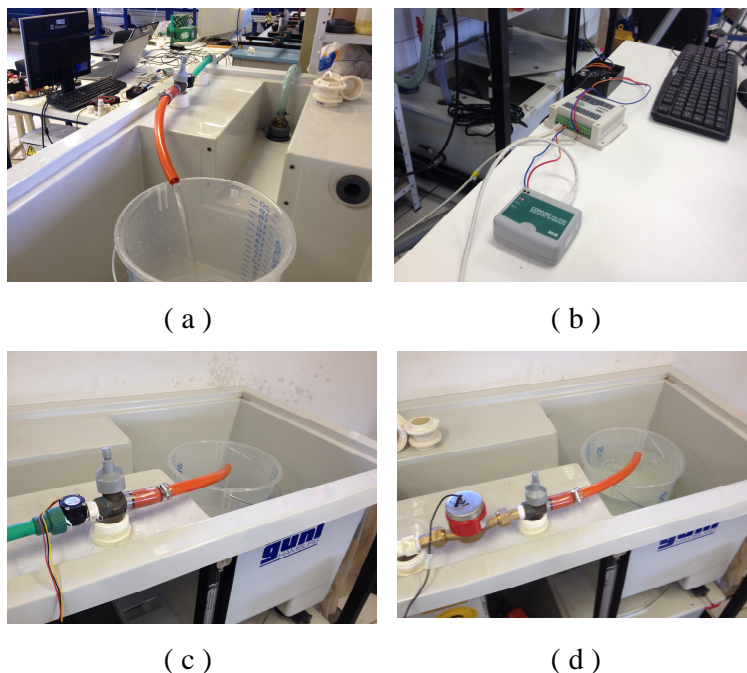


Figura G.5 – Calibração dos medidores de vazão volumétrica.

A Tab. G-3 apresenta os dados amostrais do medidor de vazão em comparação aos dados de vazão medidos a partir do balde e cronômetro (Q_c – BeC). Em seguida é apresentado os dados gerados pela equação de calibração respectivamente. A Fig. G.6 apresenta a curva de calibração do medidor de vazão volumétrica.

Tabela G-3 – Calibração do medidor de vazão volumétrica.

Amostra	Vps - Medidor Vazão [l/min]	Vps - BeC [l/min]	Vps - Equação [l/min]	Desvio Quadrático
1	1,32	1,28	1,41	0,016
2	3,81	3,98	3,89	0,007
3	8,23	8,37	8,30	0,005
4	11,69	11,81	11,74	0,005
5	15,57	15,51	15,61	0,010

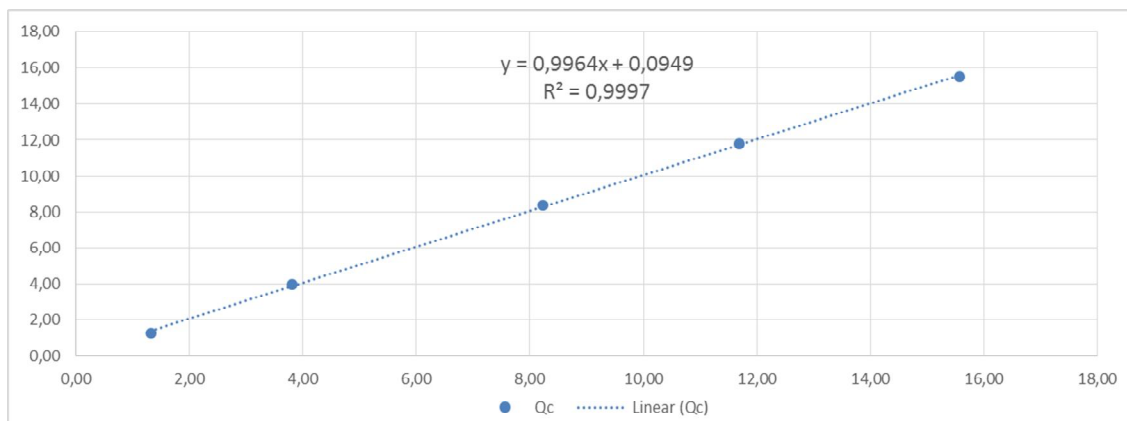


Figura G.6 – Curva de calibração do medidor de vazão volumétrica.

Com base nos dados de calibração, número de dados e desvio quadrático foi possível calcular a incerteza do medidor de vazão, conforme segue na Tab. G-4.

Tabela G-4 – Incerteza do medidor de vazão volumétrica.

Média (Qc Equação - Qc BeC)	0,00
Número Dados	5
Graus Liberdade	4
Intervalo Confiança	0,95
Nível Confiança	0,05
Distribuição t	2,78
Desvio Padrão	0,10
Incerteza (±)	0,13 l/min

A Tab. G-5 apresenta os dados amostrais do medidor de volume de água quente em comparação aos dados de volume medidos a partir do balde e cronômetro (*Vaq* – *BeC*). Em seguida é apresentado os dados gerados pela equação de calibração respectivamente. A Fig. G.7 apresenta a curva de calibração do medidor de volume de água quente.

Tabela G-5 - Calibração do medidor de volume de água quente.

Amostra	Vaq - Medidor Volume [l]	Vaq - BeC [l]	Vaq - Equação [l]	Desvio Quadrático
1	8,60	8,99	8,92	0,004
2	7,67	7,95	7,91	0,002
3	6,00	6,01	6,10	0,007
4	3,67	3,47	3,56	0,008
5	10,00	10,31	10,44	0,017
6	6,40	6,73	6,53	0,039

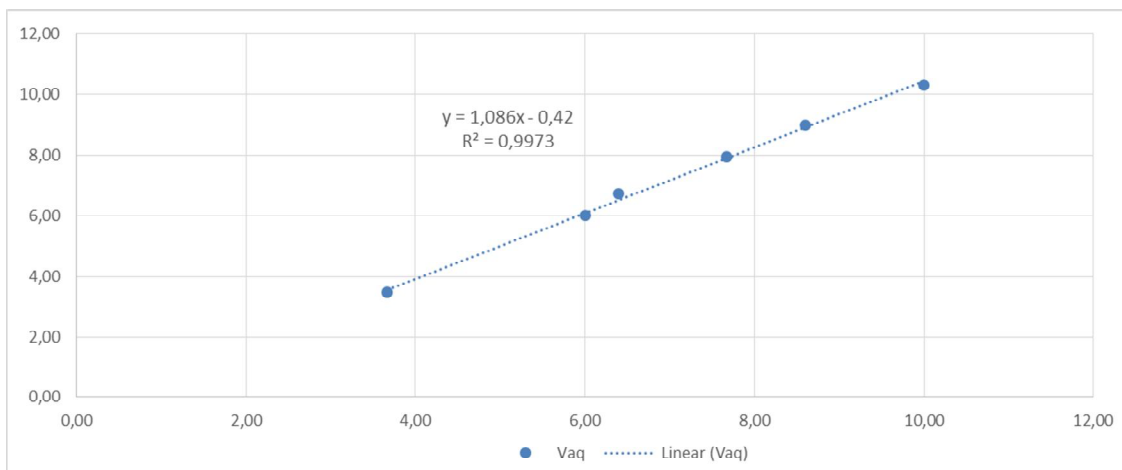


Figura G.7 - Curva de calibração do medidor de volume de água quente.

Com base nos dados de calibração, número de dados e desvio quadrático, foi possível calcular a incerteza do medidor de volume de água quente, conforme segue na Tab. G-6.

Tabela G-6 - Incerteza do medidor de volume de água quente.

Média (Vaq Equação - Vaq BeC)	-	0,00
Número Dados		6
Graus Liberdade		5
Intervalo Confiança		0,95
Nível Confiança		0,05
Distribuição t		2,57
Desvio Padrão		0,12
Incerteza (\pm)		0,131