

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE BAURU  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

RAFAEL PAIVA GARCIA

**Avaliação Experimental da Eficiência  
Térmica de Coletor Solar Plano com  
Barreiras Internas**

Bauru, SP  
2019

RAFAEL PAIVA GARCIA

**Avaliação Experimental da Eficiência  
Térmica de Coletor Solar Plano com  
Barreiras Internas**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, no programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

*Orientador:* Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

*Coorientador:* Prof. Dr. Alcides Padilha

Bauru, SP

2019

Garcia, Rafael Paiva.

Avaliação Experimental da Eficiência Térmica  
de Coletor Solar Plano com Barreiras Internas /  
Rafael Paiva Garcia, 2019

135 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Coorientador: Prof. Dr. Alcides Padilha

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

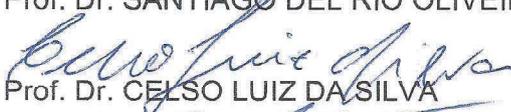
1. Coletor solar plano. 2. Convecção natural.  
3. Eficiência térmica. I. Universidade  
Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RAFAEL PAIVA GARCIA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 01 dias do mês de março do ano de 2019, às 09:30 horas, no(a) Anfiteatro do DTI / 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 - UNESP, Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Prof. Dr. RODRIGO CORREA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de RAFAEL PAIVA GARCIA, intitulada **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE COLETOR SOLAR PLANO COM BARREIRAS INTERNAS**. 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. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA

  
Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA

  
Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO

  
Prof. Dr. RODRIGO CORREA DA SILVA

**PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO**

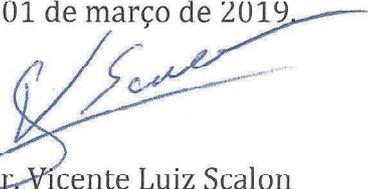
A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:  
**RAFAEL PAIVA GARCIA**

DE: "AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE COLETOR SOLAR PLANO COM  
BARREIRAS INTERNAS"

PARA:

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DE  
COLETOR SOLAR PLANO COM BARREIRAS INTERNAS

Bauru, 01 de março de 2019.



Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

orientador

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo. Por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não me deixar desanimado com as dificuldades.

Agradeço à minha família. Aos meus pais, Maria José Paiva Garcia e Getúlio Garcia de Castro, ao meu irmão, Ricardo Paiva Garcia, as minhas avós, Nerina Vasconcelos Paiva e Otilha Garcia, a minha noiva, Daiana Camargo Zilotti, e seus pais, Beto Zilotti e Silvia Zilotti, e a todos os meus familiares. Os quais são o maior presente que Deus poderia ter me dado nesta vida. Agradeço pelo apoio e pela compreensão do tempo de convívio muitas vezes sacrificado para realização deste trabalho. Por toda felicidade, carinho, compreensão, apoio, incentivo, dedicação encontrada na minha querida família que sempre farão parte de todas as minhas vitórias.

Agradeço especialmente aos meus pais e ao meu irmão por terem me dado muito apoio e não medirem esforços para que eu chegasse a mais essa etapa de minha vida.

A minha querida noiva, Daiana, por ser tão importante na minha vida. Pelo seu companheirismo, amizade, paciência, compreensão, apoio, alegria e amor. Sempre estive ao meu lado, me incentivando e me fazendo acreditar.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon e coorientador Prof. Dr. Alcides Padilha por todo o apoio e conhecimento transmitido ao longo desta pesquisa, que brilhantemente conduziram-me a ser uma pessoa melhor, tanto profissionalmente como pessoalmente, a quem os tenho como grandes amigos.

A todos os professores que passaram em minha vida, em especial aos meus professores da graduação em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) e meus professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB). Todos foram fundamentais para que eu chegasse onde estou.

Aos amigos que sempre me apoiaram nos meus desafios e objetivos e que fizeram a diferença nas horas mais importantes de minha vida.

Aos meus amigos de pós-graduação e técnicos dos laboratórios na FEB-UNESP que não mediram esforços na ajuda da montagem da bancada de ensaio, em especial ao Mario Cesar Ito que esteve presente diversas vezes.

A empresa “Solis” pelo apoio e doação dos equipamentos, a qual destaco o meu amigo Me. Eng. Leonardo Chamone Cardoso (Gerente técnico) que foi cordial em todas as horas que precisei.

Ao Instituto Federal de São Paulo (IFSP), o qual pertenço ao grupo de Docentes, que me possibilitou a oportunidade de dedicar a realização deste Doutorado e a toda equipe do campus de Birigui, que me deram todo o apoio a realização do mesmo.

Finalmente, gostaria de agradecer à Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP-FEB), por me proporcionar, além do conhecimento técnico e científico, um grande aprendizado de “Vida”.

Ninguém vence sozinho...

**OBRIGADO A TODOS!**

# Epígrafe

*“Nenhuma grande descoberta foi feita, sem um palpite ousado.”*  
*(Isaac Newton)*

# Resumo

A mudança na geração de energia através de fontes não renováveis para fontes renováveis é uma grande preocupação mundial e nacional, que tem impulsionado pesquisas e desenvolvimentos de tecnologias na área de energia renovável. Neste cenário, a energia solar é uma excelente alternativa, por ter um grande potencial e diversas aplicações. Com isso, este trabalho tem o objetivo de analisar melhorias na eficiência de coletor solar plano, equipamento utilizado no aquecimento de água através da energia solar, ao adicionar barreiras na cavidade de ar confinado entre a sua placa absorvedora e a sua cobertura de vidro. As barreiras bloqueiam o fluxo de ar, provocado pela convecção interna, diminuindo as perdas de calor. A análise foi realizada em quatro coletores, nos quais foram adicionados de uma a quatro barreiras e comparados com um coletor sem barreira como referência. Para isso, foi construída uma bancada de teste com todos equipamentos necessários para obter a eficiência em coletor solar plano. Os resultados dos ensaios mostraram que não houve uma variação significativa da absorção de radiação solar, já que a eficiência máxima manteve-se inalterada. Porém, houve uma diminuição da perda de calor ao adicionar as barreiras, sendo esse resultado diretamente relacionado a inclinação da curva de eficiência usada na análise de coletor solar plano. Os resultados mostram que a inclinação varia em -2,05%, -5,12% e 2,94%, para duas a quatro barreiras, respectivamente. Portanto, as barreiras diminuem a perda de calor para o meio, havendo um número ótimo de barreiras para cada projeto de coletor solar plano.

**Palavras-chave:** *Coletor solar plano. Convecção natural. Eficiência térmica.*

# Abstract

The shift in power generation from non-renewable sources to renewable sources is a major global and national concern that has driven research and development of renewable energy technologies. In this scenario, the solar energy is an excellent alternative, for having great potential and diverse applications. With this, the objective of this work is to analyze improvements in the efficiency of solar collector flat, equipment used in heating water through solar energy, by adding barriers in the confined air cavity between its absorber plate and its glass cover. The barriers block the flow of air, caused by internal convection, reducing heat losses. The analysis was performed on four collectors, in which one to four barriers were added and compared with a barrierless collector as a reference. For this, a test bench was built with all the necessary equipment to obtain the efficiency in the flat solar collector. The results of the tests showed that there was no significant variation in the absorption of solar radiation since the maximum efficiency remained unchanged. However, there was a decrease of the heat loss when adding the barriers, being this result directly related to the slope of the curve of efficiency used in the analysis of flat solar collector. The results show that the slope varies by -2.05%, -5.12% and 2.94% for two to four barriers, respectively. Therefore, the barriers reduce the heat loss to the medium, with an optimal number of barriers for each flat solar collector project.

**Key words:** *Flat solar collector. Natural convection. Thermal efficiency.*

# Sumário

Agradecimentos . . . . .	i
Epígrafe . . . . .	iii
Resumo. . . . .	iv
Abstract . . . . .	v
Lista de Figuras . . . . .	xi
Lista de Tabelas . . . . .	xii
Simbologia . . . . .	xv
1 Introdução . . . . .	1
1.1 Energia Solar . . . . .	4
1.1.1 O Sol . . . . .	4
1.1.2 Aplicações da energia solar . . . . .	6
1.1.3 Coletor solar de placa plana . . . . .	7
1.2 Objetivo . . . . .	14
2 Revisão Bibliográfica. . . . .	15
3 Materiais e Métodos . . . . .	25
3.1 Bancada de ensaio . . . . .	25
3.1.1 Coletor . . . . .	25
3.1.2 Estrutura de apoio do coletor. . . . .	27
3.1.3 Ângulo de inclinação. . . . .	27
3.1.4 Orientação do coletor . . . . .	28
3.1.5 Conexões hidráulica . . . . .	29
3.1.6 Reservatório de água . . . . .	29
3.1.7 Bomba d'água . . . . .	30
3.2 Instrumentação e controle . . . . .	31
3.2.1 Controlador . . . . .	31
3.2.2 Sensores de temperatura . . . . .	32
3.2.3 Sensor de temperatura ambiente . . . . .	33
3.2.4 Piranômetro . . . . .	34
3.2.5 Sensor de vazão . . . . .	36

3.2.6	Controlador de vazão. . . . .	38
3.2.7	Sensor de umidade relativa do ar . . . . .	41
3.2.8	Anemômetro . . . . .	42
3.2.9	Biruta - Sensor de direção do vento . . . . .	43
3.2.10	Módulo de memória Flash. . . . .	44
3.2.11	Caixa de controle . . . . .	45
3.3	Metodologia dos ensaios. . . . .	50
3.4	Tratamento matemático . . . . .	59
3.4.1	Filtros dos dados coletados . . . . .	59
3.4.2	Cálculo da eficiência de coletor solar . . . . .	60
3.4.3	Correção dos desvios entres os coletores . . . . .	61
3.4.4	Incerteza da instrumentação . . . . .	62
4	Resultados . . . . .	66
4.1	Resultados dos Ensaios Sem Barreira. . . . .	66
4.2	Resultado Com Barreira . . . . .	80
5	Conclusão . . . . .	85
	Referências . . . . .	92
	Apêndice . . . . .	93
A	Curva de calibração dos sensores de radiação. . . . .	94
B	Curva de calibração dos sensores de vazão. . . . .	96
C	Script da programação do controlador Arduino Mega . . . . .	97
D	Calibração dos sensores de temperatura. . . . .	102
E	Curvas de tendência da eficiência dos coletores sem barreira antes da correção. . . . .	104
	Anexo . . . . .	107
I	Manual da bomba d'água. . . . .	108
II	Relatório do ensaio coletor . . . . .	109
III	Datasheet do sensor de temperatura (Dallas-DS18B20) . . . . .	116

# Lista de Figuras

1	Consumo mundial de energia no ano de 2017 (MToe). . . . .	1
2	Consumo mundial de energia no ano de 2017, por tipo de fonte. . . . .	2
3	Consumo mundial de energias renováveis e não renováveis no ano de 2017. . . . .	2
4	Porcentagem da produção de energia primária do Brasil no ano de 2016. . . . .	3
5	Acumulado da produção de energia primária do Brasil no ano de 2016. . . . .	3
6	Comparação da dimensão das fontes disponíveis com a energia solar. . . . .	5
7	Área necessária de energia solar para suprir a demanda mundial. . . . .	5
8	Espectro da radiação solar. . . . .	6
9	Movimento de rotação e translação da Terra. . . . .	7
10	Nível de radiação incidente na Terra. . . . .	7
11	Nível de radiação incidente no Brasil. . . . .	8
12	Aplicações em energia solar. . . . .	9
13	Coletor solar de placa plana. . . . .	10
14	Partes do coletor solar de placa plana. . . . .	11
15	Vista lateral do coletor solar de placa plana. . . . .	11
16	Fluxo da radiação solar no coletor solar plano. . . . .	12
17	Perdas de calor pelo topo do coletor solar plano. . . . .	12
18	Circuito térmico equivalente no topo do coletor solar plano. . . . .	13
19	Ilustração do fluxo de ar no interior das cavidades do coletor solar plano ("A"sem barreiras e "B"com barreiras). . . . .	13
20	Coefficiente de convecção interna de coletor solar plano em função da distância entre a placa de absorção e o vidro. . . . .	16
21	Ilustração do coletor com absorvedor ondulado. . . . .	17
22	Características de um coletor solar com absorção direta. . . . .	18
23	Diferentes esquemas de isolamento transparente. . . . .	19
24	(a)Geometria do TIM e (b)curva do coeficiente convectivo em relação a proporção do TIM. . . . .	21
25	Vista geral do experimento. . . . .	22

26	Varição do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades, com inclinação de 0°, 30°, 45° e 60° . . . . .	23
27	Coletor Solar Térmico de Placa Plana - Modelo Trópicos. . . . .	26
28	Gráfico da eficiência do coletor solar Trópicos, contido no relatório de ensaio realizado pelo IPT. . . . .	27
29	Suporte e inclinação do coletor. . . . .	28
30	Localização e orientação cartográfica da bancada de ensaio. . . . .	28
31	Esquema hidráulico da bancada de ensaio. . . . .	29
32	Reservatórios e suas tubulações. . . . .	30
33	Bomba D'água. . . . .	31
34	Controlador Arduino Mega. . . . .	31
35	Esquema de ligação do sensor de temperatura DS18B20 com o controlador Arduino Mega. . . . .	32
36	Etapas da confecção do sensor de temperatura para medir a temperatura da água. . . . .	33
37	Flutuador com sensor de temperatura fixado. . . . .	33
38	Etapas da confecção do sensor de temperatura para medir a temperatura ambiente do ar. . . . .	34
39	Etapas da confecção do sensor piranômetro. . . . .	35
40	Piranômetros instalados no IPMet. . . . .	36
41	Piranômetros térmico e o SIR instalados na bancada de ensaio. . . . .	36
42	Esquema de ligação do sensor piranômetro SIR com o controlador Arduino Mega. . . . .	37
43	Esquema de ligação do sensor de vazão YF-S201 com o controlador Arduino Mega. . . . .	37
44	Acoplamento do motor de passo com a válvula. . . . .	38
45	Fluxograma do controle de vazão. . . . .	39
46	Gráfico do controle PID da vazão, iniciando com mínima vazão. . . . .	39
47	Gráfico do controle PID da vazão, iniciando com máxima vazão. . . . .	40
48	Esquema de ligação do sensor de vazão YF-S201 e o motor de passo com o controlador Arduino Mega. . . . .	40
49	Circuito eletrônico do controle de vazão. . . . .	41
50	Imagem da trilha (I) e dos componentes eletrônicos (II) gerado pelo software Eagle, para a placa do controle de vazão. . . . .	41
51	Imagem da trilha em papel fotográfico, da trilha na placa de circuito impresso e dos componentes eletrônicos soldados na placa de circuito impresso da placa para controle da vazão. . . . .	42
52	Distribuição dos equipamentos no conjunto do controle da vazão. . . . .	42
53	Caixa de proteção do controle de vazão. . . . .	43
54	Esquema de ligação do sensor de umidade DHT11 com o controlador Arduino Mega. . . . .	44

55	Funcionamento do <i>reed switch</i> . . . . .	44
56	Estação meteorológica (temperatura ambiente, biruta e anemômetro). . . . .	45
57	Esquema de ligação do sensor de anemômetro com o controlador Arduino Mega. . . . .	45
58	Esquema do circuito eletrônico da biruta eletrônica. . . . .	46
59	Esquema de ligação do sensor de velocidade do vento com o controlador Arduino Mega. . . . .	47
60	Placa eletrônica <i>Shield Gravity</i> . . . . .	47
61	Esquema de ligação do módulo SD com o controlador Arduino Mega. . . . .	47
62	Caixa de controle. . . . .	49
63	Estrutura de proteção da bomba d'água e caixa de controle. . . . .	49
64	Fluxograma da programação da bancada de ensaio. . . . .	50
65	Retirada do vidro original do coletor. . . . .	51
66	Etapas de fixação do vidro do coletor. . . . .	52
67	Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio inicial (Vista da lateral esquerda). . . . .	53
68	Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio inicial (Vista da lateral direita). . . . .	54
69	Barreiras de vidro. . . . .	55
70	Fixação da barreira. . . . .	55
71	Coletores com barreiras instalados na bancada de ensaio. . . . .	56
72	Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio com barreiras (Vista Frontal). . . . .	57
73	Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio com barreiras (Vista da lateral esquerda). . . . .	57
74	Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio com barreiras (Vista da lateral direita). . . . .	58
75	Visualização da mudança de regime transiente para regime permanente da temperatura de saída do coletor. . . . .	59
76	Ilustração do ajuste da inclinação da curva do coletor solar. . . . .	62
77	Ilustração do ajuste da posição da curva do coletor solar. . . . .	62
78	Vazões d'água dos coletores nos ensaios sem barreira. . . . .	67
79	Temperatura da água na entrada dos coletores nos ensaios sem barreira. . . . .	69
80	Temperatura da água na saída dos coletores nos ensaios sem barreira. . . . .	70
81	Diferença das temperaturas da água entre a entrada e saída dos coletores nos ensaios sem barreira. . . . .	71
82	Radiação nos ensaios sem barreira. . . . .	72
83	Temperatura ambiente nos ensaios sem barreira. . . . .	72

84	Umidade relativa do ar nos ensaios sem barreira. . . . .	73
85	Velocidade do vento nos ensaios sem barreira. . . . .	73
86	Energia térmica absorvida dos coletores nos ensaios sem barreira. . . . .	74
87	Eficiência dos coletores nos ensaios sem barreira. . . . .	75
88	Eficiência pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão (posição 1). . . . .	78
89	Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 3. . . . .	78
90	Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 4. . . . .	79
91	Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 5. . . . .	79
92	Radiação nos ensaios com barreira. . . . .	81
93	Temperatura ambiente nos ensaios com barreira. . . . .	81
94	Eficiência pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão (posição 1). . . . .	82
95	Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 3. . . . .	83
96	Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 4. . . . .	83
97	Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 5. . . . .	84
98	Comparação das eficiências corrigidas pelo parâmetro de perda de calor. . . . .	84

# Lista de Tabelas

1	Dados do coletor solar Trópicos, contidos no relatório de ensaio realizado pelo IPT.	26
2	Valor da tensão, direção e posição em relação ao valor da resistência do anemômetro.	46
3	Listagem das portas A/D usadas.	48
4	Incerteza da eficiência térmica dos coletores ( $W_{\eta}$ ).	76
5	Incerteza da eficiência térmica comparativa dos coletores ( $W_{\eta c}$ ).	76
6	Valores dos coeficiente da curva de eficiência dos coletores no ensaio sem barreira, sem e com correção.	77
7	Valores dos coeficientes de correção da curva de eficiência dos coletores dois a cinco em relação ao coletor um (referência).	77
8	Arranjo dos coletores solares ensaiados.	80
9	Valores dos coeficiente da curva de eficiência dos coletores no ensaio com barreira e com correção.	82
10	Média das medidas dos sensores de temperatura.	103

# Simbologia

## Abreviações

*3D* Três dimensões ou tridimensional

*ABNT* Associação brasileira de normas técnicas

*ABS* Acrylonitrile butadiene styrene (tipo de plástico)

*CR<sub>1</sub>* Constante angular da curva de calibração do sensor de radiação

*cv* Cavalo vapor

*CV<sub>1</sub>* Constante angular da curva de calibração do sensor de vazão

*CV<sub>2</sub>* Constante linear da curva de calibração do sensor de vazão

*IPMeT* Instituto de pesquisas meteorológicas

*IPT* Instituto de pesquisas tecnológicas

*MT<sub>oe</sub>* Milhões de tonelada de óleo equivalente

*PID* Proporcional integral derivativo

*PVC* Policloreto de polivinila (tipo de plástico)

*PVT* Photovoltaic / thermal (sistemas híbridos)

*PWM* Pulse width modulation (modulação de largura de pulso)

*TIM* Thermal insulation material

*W<sub>x</sub>* Incerteza resultante da variável *x*

## Símbolos

$\beta$  Ângulo de inclinação do coletor [graus]

$\Delta T$  Diferença da temperatura de saída e entrada do fluido [°C]

$\dot{m}$	Vazão mássica do fluido [kg/s]
$\dot{Q}$	Energia térmica absorvida pelo coletor [W]
$\eta$	Eficiência [Adimensional]
$\eta_{0a}$	Termo independente da equação da eficiência do coletor [Adimensional]
$\Phi$	Latitude geométrica [graus]
$\sigma$	Desvio padrão
$a_{1a}$	Coefficiente linear da equação da eficiência do coletor [W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$a_{2a}$	Coefficiente quadrático da equação da eficiência do coletor [W/(m <sup>2</sup> .°C <sup>2</sup> )]
$A_{col}$	Área transparente do coletor [m <sup>2</sup> ]
$c_p$	Calor específico da água [J/(kg.K)]
$c_{a1}$	Coefficiente de ajuste 1
$c_{a2}$	Coefficiente de ajuste 2
$c_{a3}$	Coefficiente de ajuste 3
$EP$	Erro padrão
$G$	Irradiação solar global no plano do coletor [W]
$I_\eta$	Incerteza da eficiência térmica [Adimensional]
$I_{Acol}$	Incerteza da área medida [m <sup>2</sup> ]
$N$	Tamanho da amostra
$PPC$	Parâmetro de perda de calor [°C/W]
$S$	Irradiação solar global incidente no coletor [W]
$T_a$	Temperatura ambiente [°C]
$T_e$	Temperatura do fluido na entrada do coletor [°C]
$T_m$	Temperatura média entre a temperatura de entrada e saída do fluido [°C]
$T_s$	Temperatura do fluido na saída do coletor [°C]
$t_{95\%}$	Valor do t de student para 95% de confiança

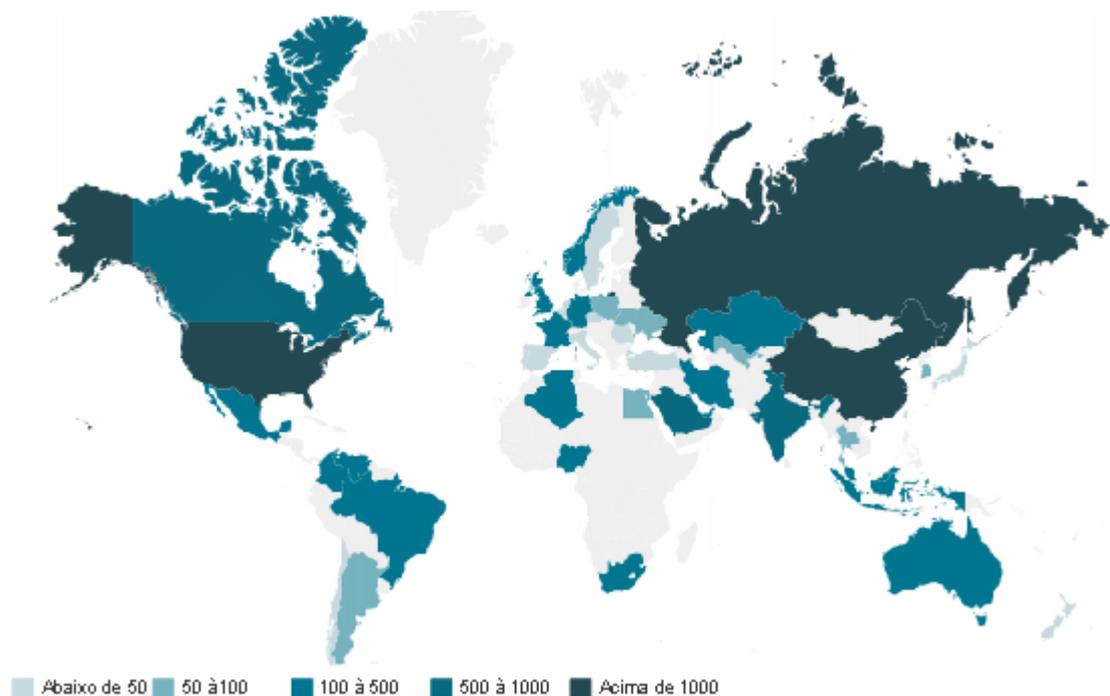
$x$	Valor obtido da abscissa
$x$	Valor obtido da ordenada
$x'$	Valor ajustado da abscissa
$y'$	Valor ajustado da ordenada

# Capítulo 1

## Introdução

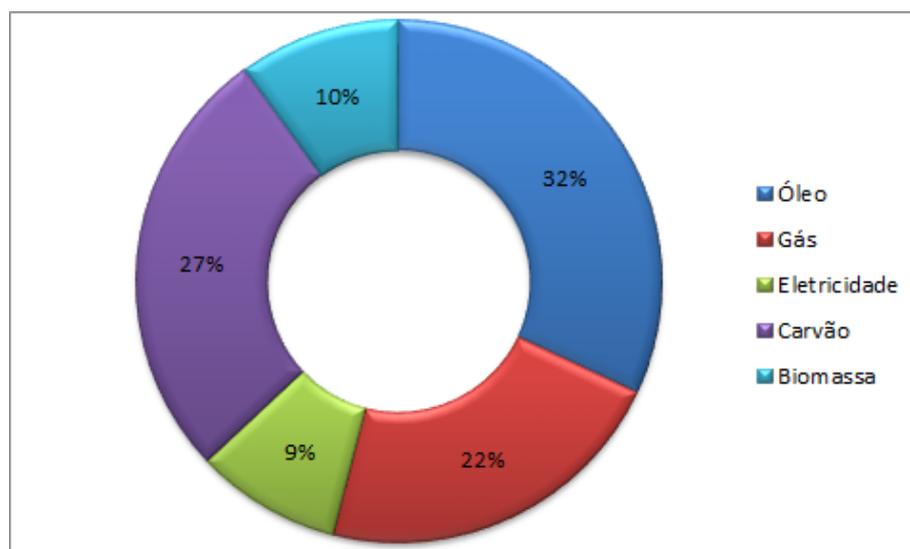
Atualmente, um dos grandes desafios da humanidade é a geração de energia, haja visto que a população e o consumo de energia per capita estão em ascensão. Outro fator importante é a dependência de fontes não renováveis, como o petróleo e o gás natural, aumentando ainda mais este desafio. Este cenário está impulsionando pesquisas voltadas para o desenvolvimento de tecnologias em energia limpa, ou seja, energia renovável. As Figuras 1 e 2 mostram a quantidade de consumo de energia por país e o tipo de fonte em 2017, respectivamente, na qual fica evidente a forte dependência de fontes de energia não renováveis, como é ilustrado na Figura 3. (ENERDATA, 2018)

Figura 1: Consumo mundial de energia no ano de 2017 (MToe).



Fonte: ENERDATA (2018)

Figura 2: Consumo mundial de energia no ano de 2017, por tipo de fonte.

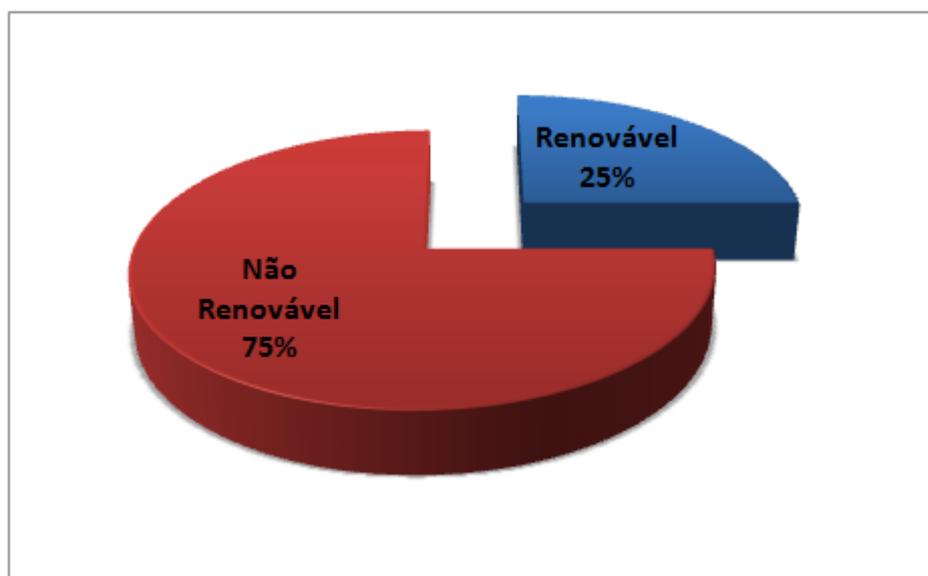


Fonte: *ENERDATA (2018)*

As Figuras 4 e 5 mostram a oferta de energia no cenário nacional. Embora haja um excelente aproveitamento da bacia hídrica, com as usinas hidroelétricas, considerado uma energia renovável, a crise hídrica de 2015, que causou racionamento de água em várias regiões do Brasil, mostrou que é necessário criar outras alternativas energéticas, para haver mais controle desse recurso em situações de crise. (*EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016*)

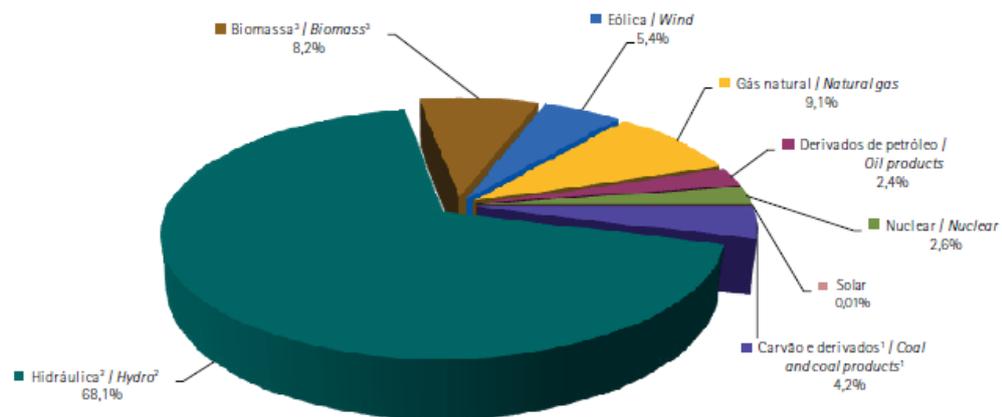
Em 1956, o geólogo M. King Hubbert, publicou um artigo que mostrava um método de cálculo da previsão da produção do petróleo, no qual concluiu que havia um pico da produção e um declínio

Figura 3: Consumo mundial de energias renováveis e não renováveis no ano de 2017.



Fonte: *ENERDATA (2018)*

Figura 4: Percentagem da produção de energia primária do Brasil no ano de 2016.



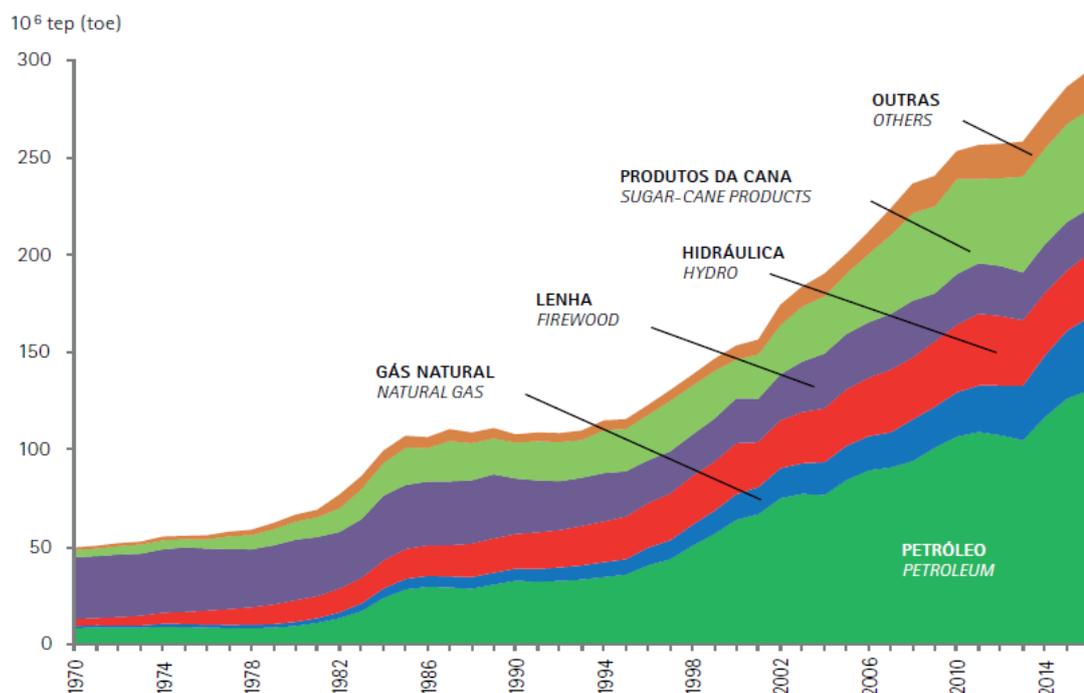
Notas / Notes:

1. Inclui gás de coqueria / Includes coke oven gas
2. Inclui importação de eletricidade / Includes electricity imports
3. Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações / Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016)

após o pico de produção, até o esgotamento dos recursos, ficando conhecido na literatura com "A teoria do pico de Hubbert". Seus argumentos e previsões foram muito discutidos, provocando mais de 1400 citações da publicação original até o momento. Muitos outros autores vêm estudando o assunto e a média das previsões mostram que as fontes de petróleo devem durar até meados de 2100. Outras fontes indicam o mesmo caminho, mas atingindo o declínio em tempos diferentes.

Figura 5: Acumulado da produção de energia primária do Brasil no ano de 2016.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016)

(JONES & WILLMS, 2018)

Em geral, há uma tendência mundial de mudança na matriz energética atual e, para alcançar esse objetivo, além de incentivos a pesquisas nesse tema, há a necessidade de mudanças políticas e culturais no tema de energia renovável. Alguns países já desenvolveram incentivos fiscais e a população está entendendo a importância da sustentabilidade, a qual produtos com uma base sustentável tem um valor agregado quando comparado com outros que não tem o apelo sustentável.

Nas Figuras 4 e 5, nota-se que há pouco aproveitamento de energias renováveis como a energia solar e eólica no Brasil. Apesar disso, o país vem adotando políticas para melhorar este cenário, criando leis que incentivam a utilização de energias renováveis, a exemplo da isenção de impostos para fabricantes de equipamento de energia renovável, e a lei municipal da cidade de São Paulo, nº 14.459, de 3 de julho de 2007, que obriga a instalação de sistema de aquecimento de água por meio do aproveitamento da energia solar, nas novas edificações. No aspecto cultural, os produtos sustentáveis e renováveis vêm crescendo aos poucos no gosto e consciência dos brasileiros. Um bom exemplo é a valorização de imóveis com a instalação de equipamentos de captação de energia solar, a qual a valorização acaba sendo superior ao custo da instalação destes equipamentos, refletindo o valor agregado da sustentabilidade. (ABRAVA, 2018))

Porém, ainda há muito o que se fazer no cunho político e cultural para alavancar o setor de energia renovável e mudar de maneira relevante o cenário atual da matriz energética nacional.

Neste contexto, pode-se destacar a energia solar, uma das principais fontes de energia renováveis, que ainda é pouco aproveitada.

## 1.1 Energia Solar

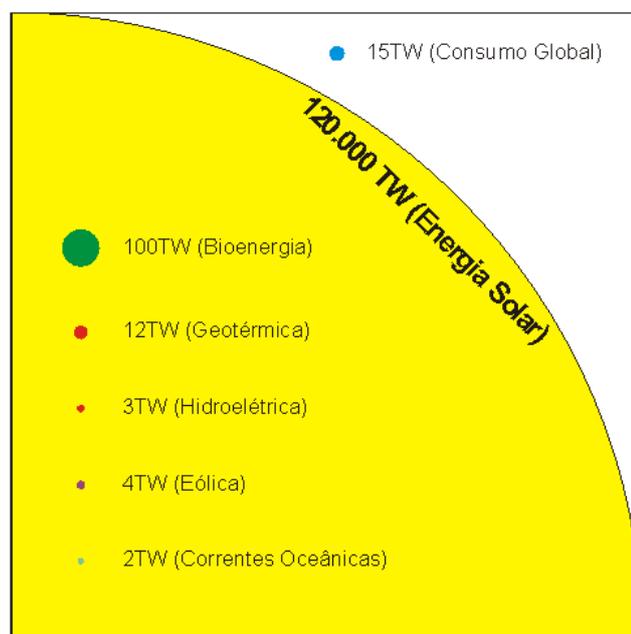
### 1.1.1 O Sol

O Sol é uma estrela com diâmetro de 1,4 milhões de quilômetros, distante a cerca de 150 milhões de quilômetros da Terra. Libera energia na ordem de  $4 \times 10^{26}$  W, equivalente a 10 bilhões de usinas do porte da usina de Itaipu ou à queima de  $2 \times 10^{20}$  galões de gasolina por minuto. Sua energia é proveniente de reações termonucleares que ocorrem em seu núcleo e sua superfície atinge temperaturas na ordem de 6000K. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

Na Figura 6 pode-se comparar a potência da energia solar incidente na Terra com a potência de outras fontes utilizadas, a qual é possível mensurar o quão é expressivo a energia solar. A Figura 7 mostra que o somatório da energia solar que chega em apenas em alguns pontos do planeta (círculos pretos na figura) tem a mesma dimensão do consumo de energia global. Tanto a Figura 6 como a Figura 7 não levam em consideração a implementação tecnológica do aproveitamento da energia solar, nem a relação dos seus custos com o retorno financeiro através da economia energética. Desta forma, as Figuras não levam em conta as limitações da energia solar, tendo

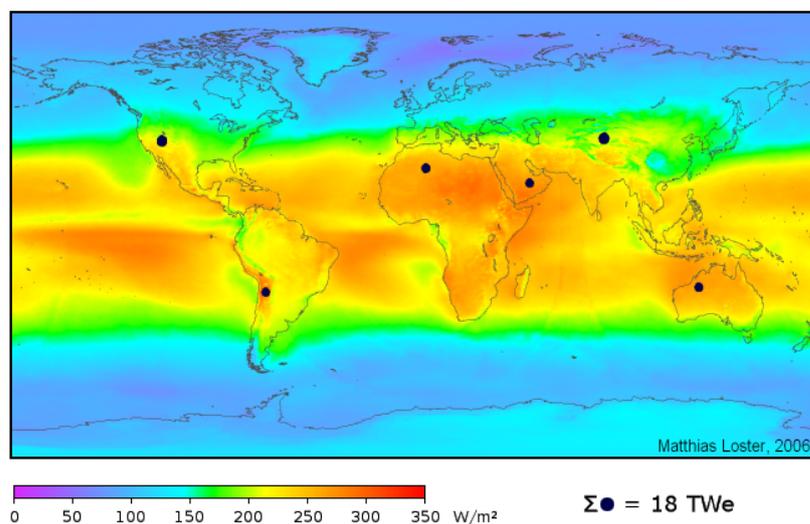
apenas o objetivo de realçar a dimensão do potencial dessa energia.

Figura 6: Comparação da dimensão das fontes disponíveis com a energia solar.



Fonte: ABSOLAR (2016)

Figura 7: Área necessária de energia solar para suprir a demanda mundial.

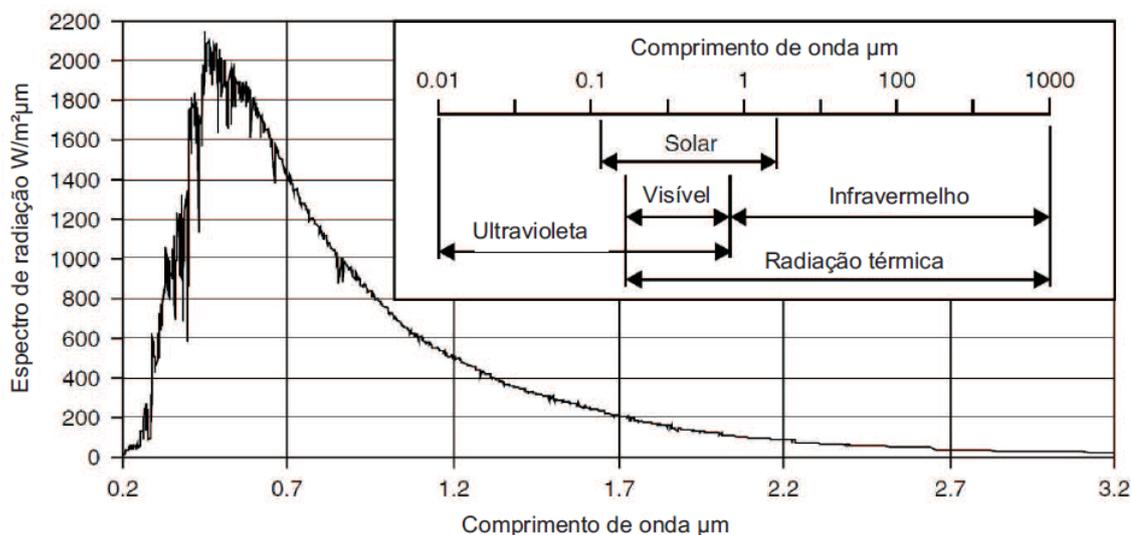


Fonte: ABSOLAR (2016)

A energia solar é propagada por ondas eletromagnéticas. A definição de "constante solar" é a energia incidente perpendicular a Terra, no instante antes de entrar na atmosfera, com o valor aproximado de 1367 W/m<sup>2</sup>. A constante solar corresponde ao máximo valor da radiação solar incidente. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

A energia da radiação solar abrange uma ampla gama de comprimentos de onda e intensidades, a qual denomina-se de distribuição espectral da radiação solar extraterrestre. A Figura 8 mostra o espectro solar que chega a uma distância média da Terra com o Sol. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

Figura 8: Espectro da radiação solar.



Fonte: Kalogirou (2016)

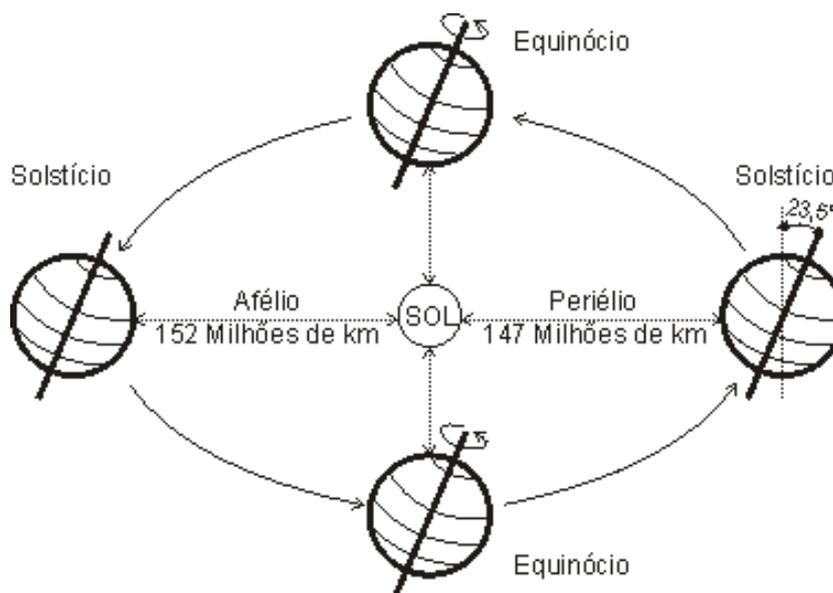
O movimento da translação da Terra em torno do Sol, o movimento de rotação da Terra em seu próprio eixo e a inclinação de  $23,45^\circ$  em relação a normal do plano da órbita terrestre, ilustrado na Figura 9, geram as mudanças de incidência de radiação ao longo do ano. A latitude também influencia a intensidade da radiação incidente. Todos esses parâmetros devem ser levados em consideração para projetar um sistema de captação da energia solar. Nas Figuras 10 e 11 é possível verificar a distribuição e os índices médios de radiação solar incidentes na Terra e no Brasil, respectivamente.

### 1.1.2 Aplicações da energia solar

A energia solar pode ser aplicada de várias formas, através das construções otimizadas em função do movimento solar, equipamentos fotovoltaicos que geram eletricidade, sistemas de secagem (grãos, etc), e equipamentos de aquecimento de água e de ambientes. A Figura 12 ilustra uma síntese das aplicações da energia solar.

Dentre todas as aplicações da energia solar, destaca-se a energia aplicada no aquecimento de água. Esse aquecimento pode ser usado para o banho, para aquecimento de fluidos na indústria, entre outras utilizações. Esse tipo de alternativa para a captação da energia solar é muito comum. Há vários tipos de equipamento para aquecer fluidos por energia solar. O coletor de placa plana é um dos mais utilizados atualmente, portanto, será feita uma abordagem apenas nesse tipo de coletor solar, por ser o equipamento de estudo deste trabalho. A Figura 13 mostra este equipamento.

Figura 9: Movimento de rotação e translação da Terra.



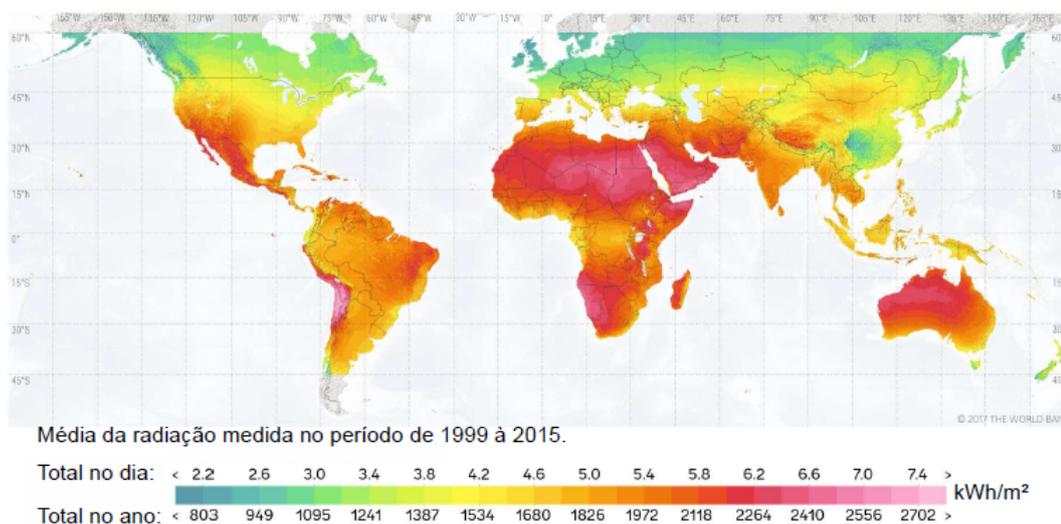
Fonte: *Duffie & Beckman (2013)*

### 1.1.3 Coletor solar de placa plana

Os coletores de placa plana em geral são compostos por cinco itens, como mostrados na Figura 14, estes itens são:

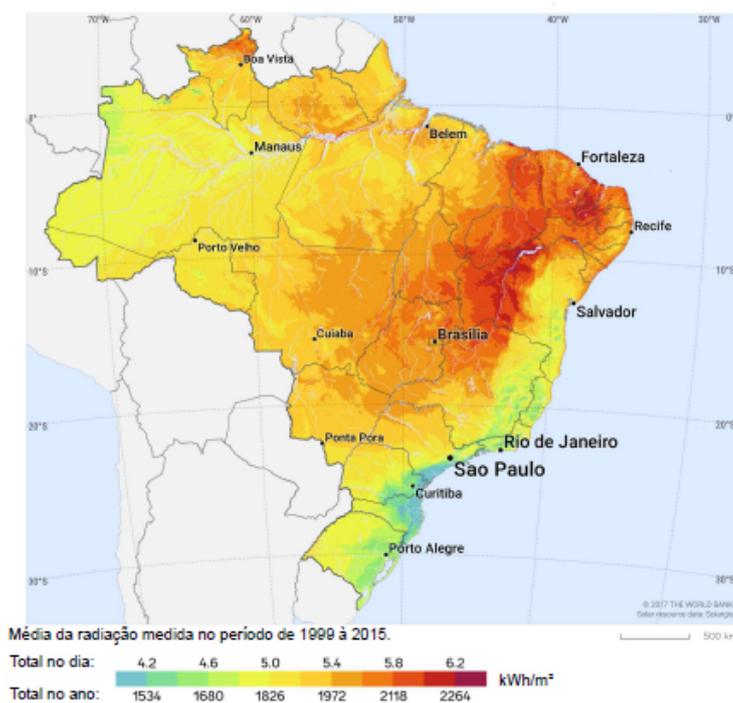
- Cobertura: Uma ou mais camadas de vidro ou outro material translúcido, ou seja, que permite a passagem da luz solar. O mais comum é uma camada de vidro de 4 mm de espessura. O objetivo da cobertura é de estabelecer o "efeito estufa", ou seja, aprisionar o ar no interior do coletor, formando uma cavidade com ar aquecido;

Figura 10: Nível de radiação incidente na Terra.



Fonte: *SOLARGIS (2018)*

Figura 11: Nível de radiação incidente no Brasil.



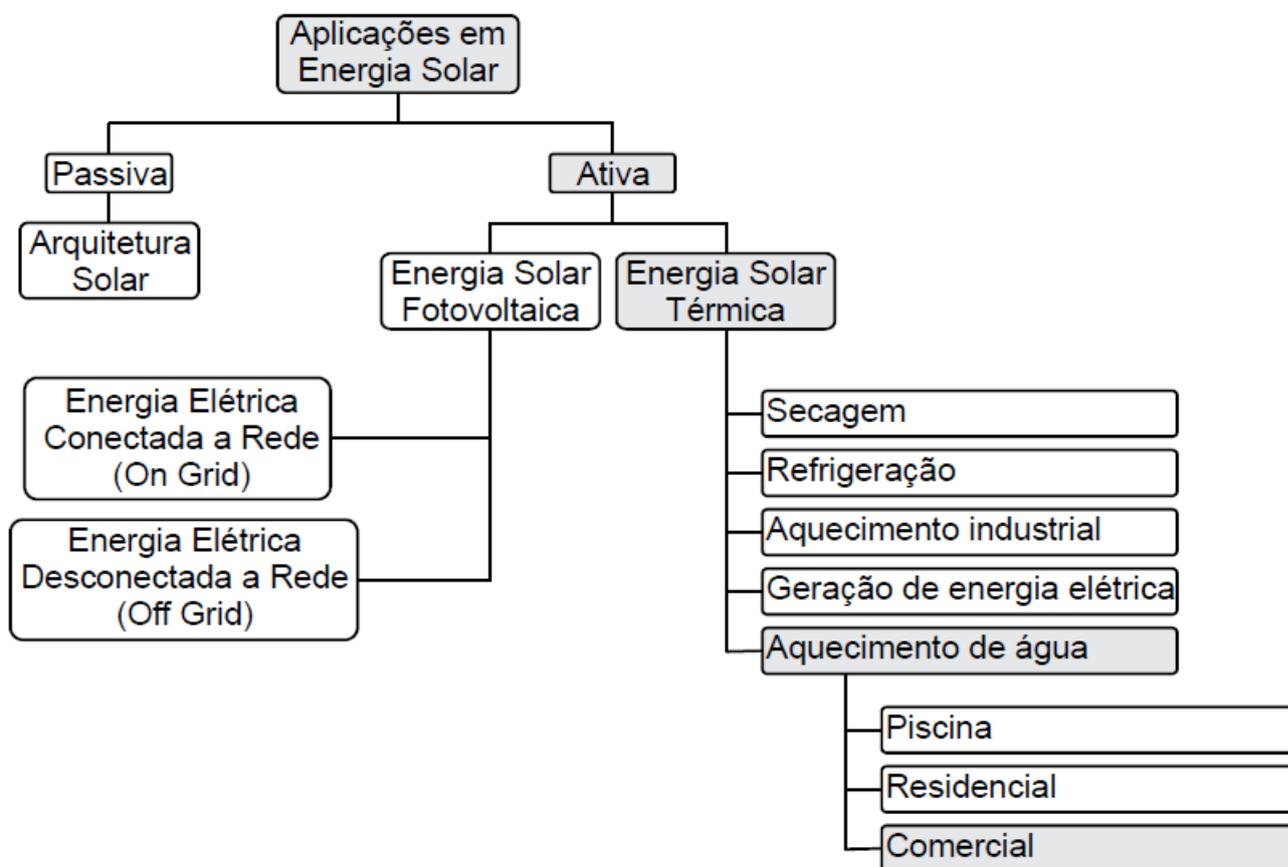
Fonte: SOLARGIS (2018)

- Placas absorvedora: Placas planas, onduladas ou sulcadas fixadas aos tubos por onde o fluido a ser aquecido escoar. São pintadas com tintas de alta absorvidade e baixa emissividade. A função das placas é absorver a radiação solar;
- Tubos para o fluxo do fluido: Tubos e conexões por onde o fluido circula são constituídos por materiais de boa condutibilidade térmica para transferir o calor absorvido para o fluido;
- Isolamento térmico: Material colocado na parte inferior e/ou nas laterais com a função de minimizar as perdas térmicas. Ao contrário do material dos tubos, o material do isolamento deve ter baixa condutividade;
- Caixa: Estrutura para acomodação de todos os outros itens, a fim de servir como suporte mecânico.

Uma vista lateral do coletor é mostrada na Figura 15. Nota-se que não há um espaço entre a caixa, isolamento, tubo e placa absorvedora, porém, existe um espaçamento relevante em que o ar fica confinado numa cavidade.

De toda a irradiação incidente nos coletores, uma parcela é refletida e outra é absorvida pela placa de absorção. Uma parte do calor absorvido é perdido para o ambiente pela base, pela lateral e pelo topo, conforme ilustração da Figura 16. Como já comentado, as perdas pela base são pequenas devido ao isolamento térmico. As perdas pela lateral também são pequenas, mesmo que não isoladas, devido a pequena área. A maior parcela da perda de calor ocorre pelo topo do coletor.

Figura 12: Aplicações em energia solar.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Assim, pode-se dividir a perda de calor do topo em quatro vertentes: fluxo de calor por radiação e convecção da placa absorvedora para a cobertura e fluxo de calor por radiação e convecção da cobertura para o meio ambiente, conforme Figura 16.

As Figuras 17 e 18 destacam as perdas de calor e o circuito térmico equivalente que flui pelo topo do coletor, respectivamente.

Dessas quatro perdas, é possível minimizar a perda por convecção entre a placa absorvedora e a cobertura, com a introdução de barreiras no interior dos coletores. Essas barreiras vão bloquear o fluxo do ar dentro dos coletores. O fluxo de ar ocorre devido a diferença de densidade do ar com a mudança de temperatura, provocando a convecção natural do ar no interior dos coletores. A Figura 19 ilustra o fluxo de ar dentro das cavidades do coletor sem e com barreiras.

A Figura 19 tem como objetivo ilustrar o fluxo do ar no interior do coletor estabelecido pela convecção natural, porém, deve-se lembrar que o efeito convectivo é diretamente proporcional a dimensão da área e a diferença de temperatura. Assim, as barreiras provocarão a diminuição do fluxo interno. (BERGMAN & LAVINE, 2014)

Para aumentar a eficiência destes coletores há dois meios. Visto que a eficiência mede o quanto se consegue absorver de radiação térmica, uma possibilidade seria aumentar a absorção da radi-

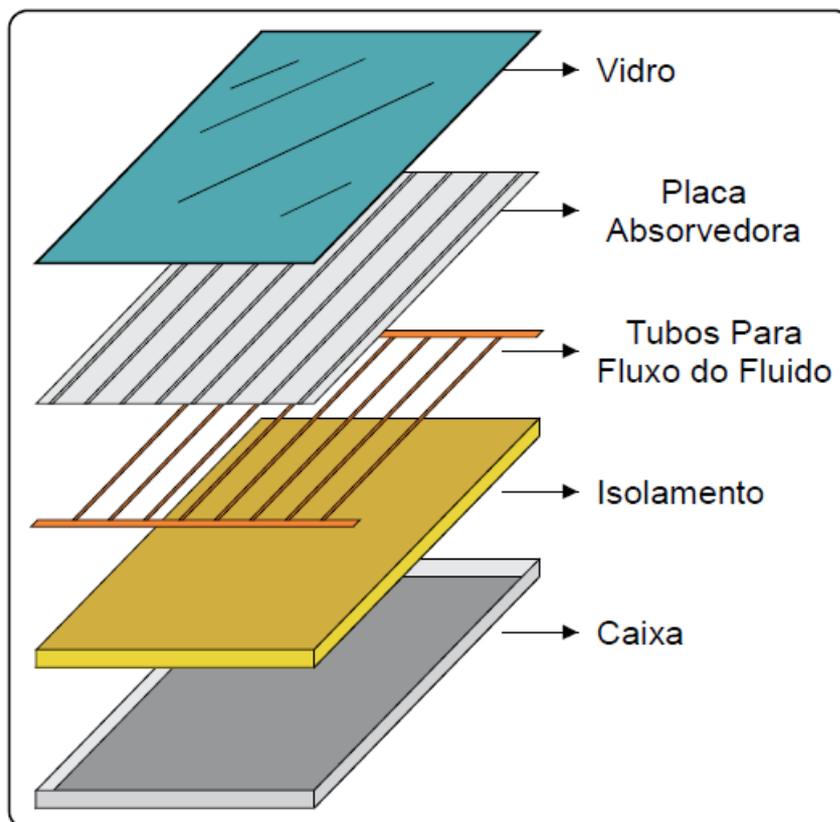
Figura 13: Coletor solar de placa plana.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

ação solar. Porém, atualmente já são usado tintas de baixa emissividade, que absorvem até 95% da radiação. A segunda opção, seria diminuir a perda de calor para o ambiente, a qual é uma alternativa com maior potencial para conseguir aumentar a eficiência dos coletores. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

Figura 14: Partes do coletor solar de placa plana.



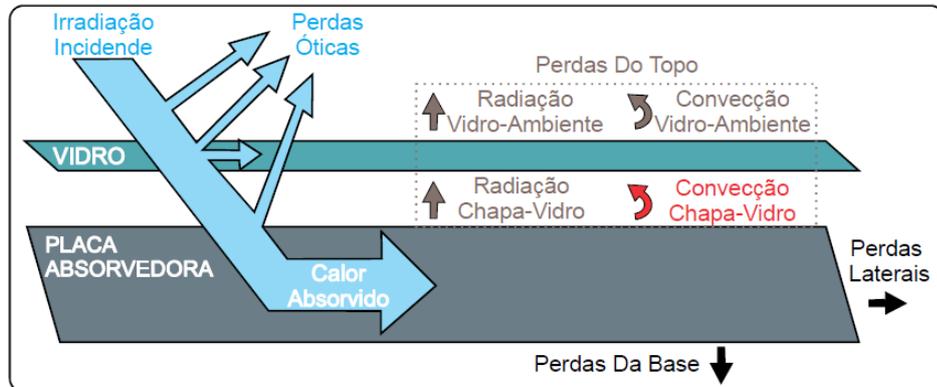
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 15: Vista lateral do coletor solar de placa plana.



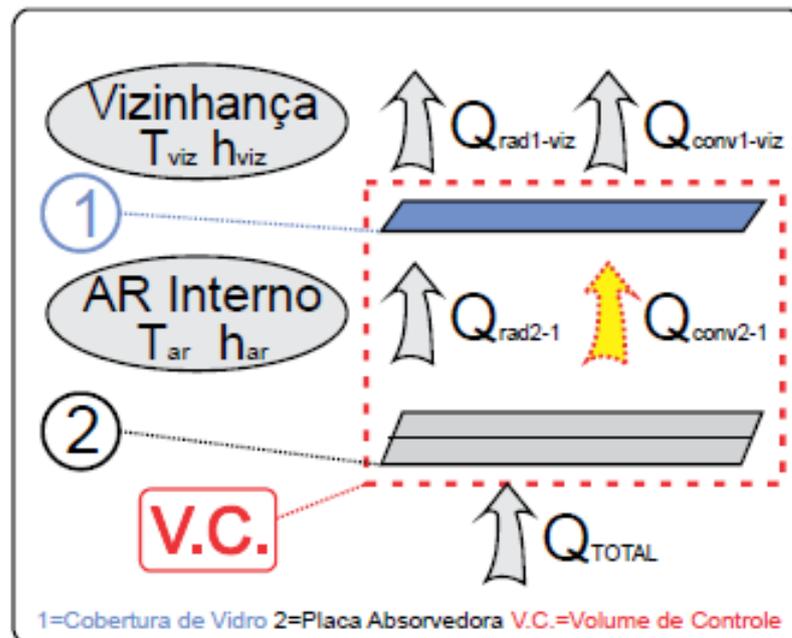
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 16: Fluxo da radiação solar no coletor solar plano.



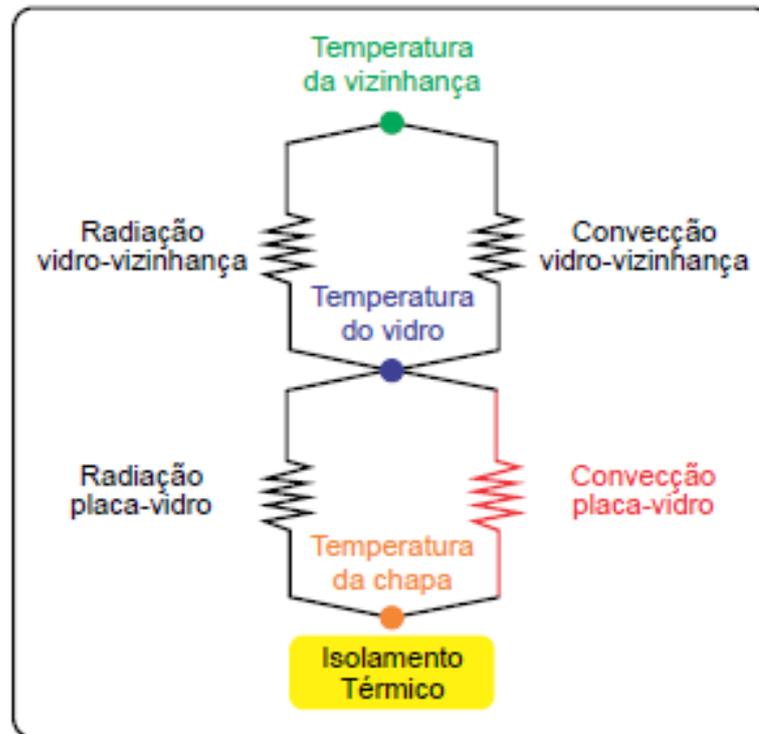
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 17: Perdas de calor pelo topo do coletor solar plano.



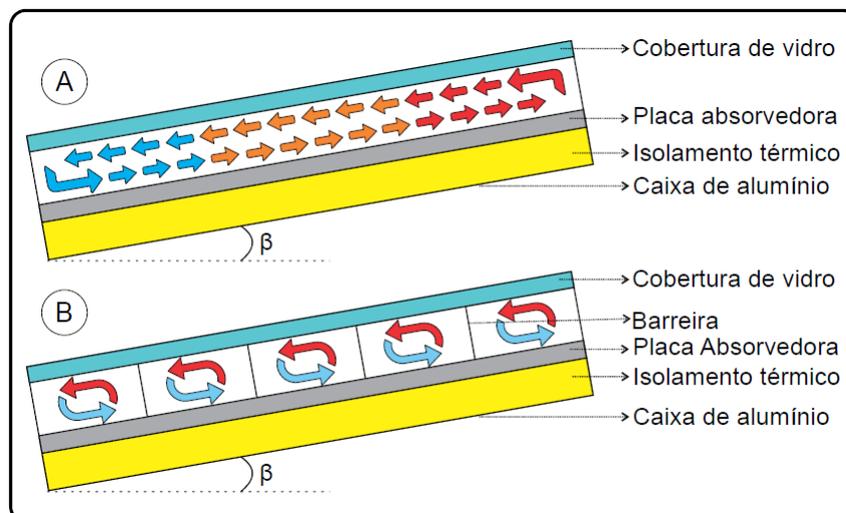
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 18: Circuito térmico equivalente no topo do coletor solar plano.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 19: Ilustração do fluxo de ar no interior das cavidades do coletor solar plano ("A" sem barreiras e "B" com barreiras).



Fonte: O próprio autor, 2019.

## 1.2 Objetivo

Nesse contexto, este estudo tem o objetivo de avaliar a variação da eficiência térmica de coletores solares de placas planas pela introdução de barreiras em suas cavidades internas (região entre a placa de absorção e a cobertura de vidro), a fim de modificar o fluxo de ar no interior da cavidade, minimizando a perda de calor para o ambiente e, conseqüentemente, aumentando a sua eficiência. Para essa análise foi construída uma bancada de ensaios para os coletores solares com toda a instrumentação necessária. A bancada foi preparada para testar cinco coletores solares simultaneamente, garantindo as mesmas condições ambientais. A vazão de água em cada coletor foi controlada para ter o mesmo valor. Um dos coletores solares não foi modificado e usado como referência. Uma a quatro barreiras foram igualmente espaçadas e adicionadas aos outros coletores. Utilizou-se da eficiência térmica de cada coletor para avaliar o número de cavidades adequado a as condições propostas. Espera-se que este estudo contribua no aprimoramento de equipamentos de captação de energia solar e, com isso, possa diminuir a dependência atual de fontes de energia não renováveis.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

O crescimento do consumo de energia per capita mundial e a relevância da energia solar tem gerado muitos trabalhos científicos com esse tema, havendo muitas revistas dedicadas as pesquisas neste foco. Há várias maneiras e técnicas diferentes para utilizar a energia solar, como já mencionado no capítulo anterior. Porém, coletores de placa plana utilizados no aquecimento de água para uso doméstico e industrial é uma forma muito útil de aproveitar essa energia. Embora esses coletores estejam bem difundidos é interessante investigar possíveis melhorias na sua eficiência.

A eficiência de um coletor é a proporção de energia solar absorvida em relação a energia incidida pela radiação solar. Sendo assim, há duas formas de aumentar a eficiência destes coletores. A primeira está associada as tecnologias que aumentam a absorção da radiação incidente, como o uso de materiais com alto coeficiente de troca de calor, a exemplo do cobre e alumínio. A segunda está associada em diminuir a perda de calor, absorvida pelos coletores, para a vizinhança do coletor.

Será apresentado neste capítulo alguns trabalhos relevantes e com foco na melhoria da eficiência de coletores solares de placa plana, através da diminuição da perda de calor para a vizinhança do coletor.

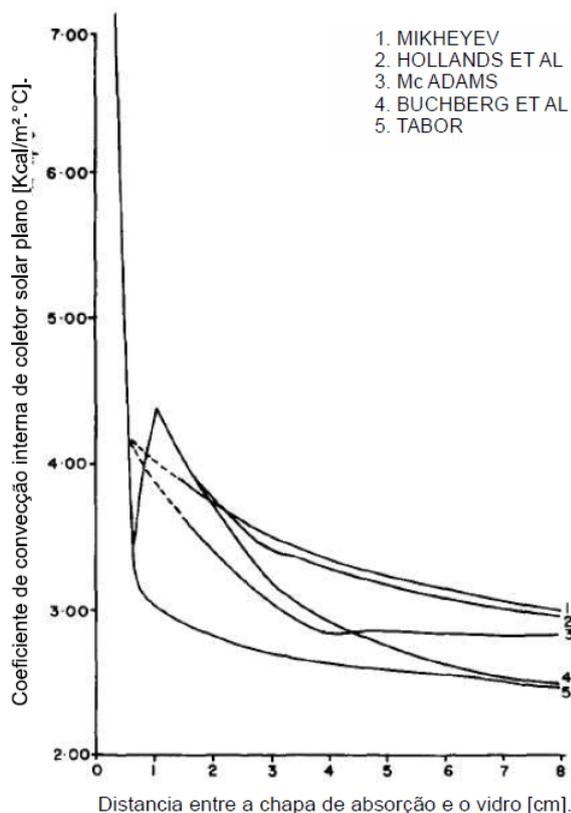
A cobertura de vidro dos coletores tem o objetivo de criar um "efeito estufa", aprisionando o ar dentro de uma cavidade entre a placa de absorção e a cobertura de vidro, conforme descrito no capítulo anterior. A distância entre estes é fundamental no projeto de um coletor.

Perdas pela convecção natural entre uma placa de absorção e o a cobertura de vidro, em diferentes tamanhos e temperaturas da placa foram previstas teoricamente por correlações empíricas desenvolvidas por [Hollands \(1965\)](#).

[Nahar & Garg \(1980\)](#) avaliaram o coeficiente de convecção interna em coletores de placa plana, analisando a inclinação, latitude local e distância entre a placa de absorção com o vidro. O aumento desta distância aumenta o sombreamento na placa de absorção, diminuindo a radiação incidente mas, por outro lado, diminui a perda por convecção. Verificaram que, para sombreamento mínimo e perdas mínimas de convecção, deve ser mantido um distância de 4 a 5 cm entre a placa de absorção

e o vidro. Mostraram a relação das correlações empíricas do coeficiente de convecção interna de coletor solar plano em função da distância entre a placa de absorção e o vidro, desenvolvidas por outros autores, citados em sua pesquisa, num mesmo gráfico que pode ser visto na Figura 20.

Figura 20: Coeficiente de convecção interna de coletor solar plano em função da distância entre a placa de absorção e o vidro.



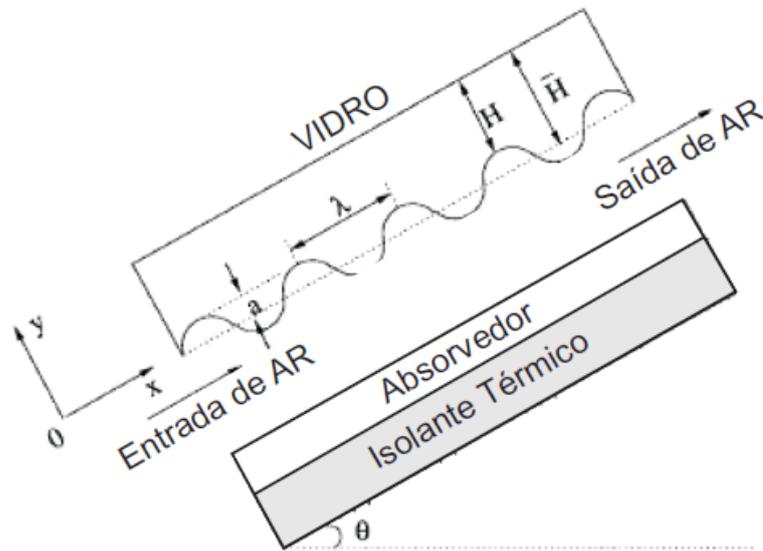
Fonte: Adaptada de Nahar & Garg (1980).

Uma outra alternativa interessante para diminuir a perda de calor com a diminuição da convecção interna de um coletor solar pode ser feita alterando a superfícies da placa de absorção de plana para onduladas. (GAO ET AL., 2000)

Gao et al. (2000) fizeram uma análise numérica para investigar a relação do coeficiente convectivo interno de um aquecedor de ar solar plano em relação aos parâmetros geométricos e físicos do coletor com absorvedor ondulado. Os parâmetros investigados foram a diferença da temperatura de saída e entrada do fluido ( $\Delta T$ ), ângulo de inclinação do coletor ( $\beta$ ),  $A = \bar{H}/a$  e  $L = 0,25\lambda/a$ . Onde  $A$  e  $L$  são características geométricas do coletor, conforme a Figura 21. Os autores fixam os valores de  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $A = 2$  e  $L = 1$  e variam apenas um destes parâmetros. Em seus resultados é possível verificar a influência destes parâmetros no coeficiente convectivo interno de um coletor solar plano. O resultado interessante mostrado pelos autores está relacionado com a variação do parâmetro "A", sendo que quanto menor o valor de "A", menor é o coeficiente convectivo. Com isso, podemos concluir que quanto maior o "A" mais parecido com barreiras será o formato do

absorvedor ondulado.

Figura 21: Ilustração do coletor com absorvedor ondulado.



Fonte: Adaptada de Gao et al. (2000).

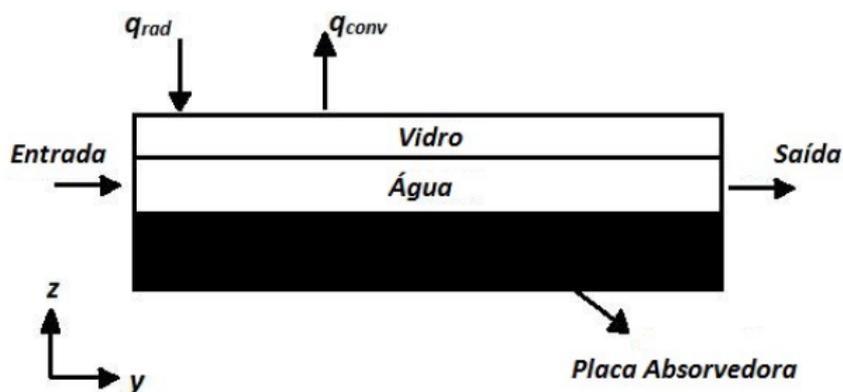
Varol & Oztop (2008) fizeram uma análise numérica com as mesmas características de Gao et al. (2000), ilustrado na Figura 21. Nesse trabalho, também concluíram que absorvedores ondulados conseguem maiores transferências de calor quando comparados com absorvedores planos. Varol & Oztop (2008) fizeram uma análise interessante, verificando a variação do número de Nusselt com a variação do número de Rayleigh. Foi possível verificar que os absorvedores ondulados tiveram maiores valores de Nusselt quando comparados com os valores obtidos pelos absorvedores planos.

O trabalho de Koulibaly et al. (2015) desenvolveu a modelagem de um coletor solar plano para aquecimento de ar operado com convecção natural, semelhante a Figura 21. Um programa em Visual Basic foi desenvolvido para simular o comportamento dinâmico do coletor, onde foram avaliados as dimensões do coletor, tipo de material de cobertura e da placa de absorção, espessura do isolamento, entre outros parâmetros de um projeto de um coletor solar. Em seus resultados pode-se destacar a eficiência em relação a distância entre o absorvedor e o vidro, variando em 25, 30, 40 e 50 mm. Como já constatado por outros autores, esta distância está diretamente ligada a eficiência destes equipamentos. Um resultado interessante levantado pelo autor é a diminuição da eficiência com o aumento do comprimento do coletor, além de ter concluído que a influência da distância do absorvedor ao vidro aumenta com o aumento do coletor.

Uma outra forma alternativa de aquecimento de fluidos em coletores solares pode ser feito com absorção direta, na qual o fluido entra em contato direto com a placa de absorção da radiação solar, ao invés de tubos, conforme Figura 22. Gonçalves (2016) fez uma análise de um modelo numérico de uma geometria de coletor solar baseada no coletor de absorção direta, utilizando o software

OpenFOAM®. Usou as condições de contorno ideais para escoamento fixando a vazão na entrada do coletor em  $2,0 \text{ L/min.m}^2$ . Gonçalves (2016) analisou a curva de rendimento da geometria estudada, variando a espessura da região onde o fluido que escoava dentro do coletor, de 1 a 5 mm. O autor verificou que a influência da espessura no rendimento térmico é pequena nas espessuras avaliadas, porém, o rendimento da maior espessura (5,0 mm) é levemente maior em relação ao rendimento das espessuras menores. Assim como Koulibaly et al. (2015), Gonçalves (2016) também fez uma análise do coeficiente convectivo em função do tamanho do coletor, na qual os resultados apontaram a mesma tendência da diminuição do coeficiente convectivo, acarretando uma menor perda de calor e aumento da eficiência do coletor. Uma outra análise interessante, que Gonçalves (2016) mostrou em seus resultados, está associada ao efeito da variação da vazão na eficiência do coletor, mostrando que a eficiência é influenciada pela vazão do coletor.

Figura 22: Características de um coletor solar com absorção direta.



Fonte: Gonçalves (2016).

Outra alternativa interessante para diminuir a perda de calor de um coletor solar pode ser realizada adicionando barreiras no interior das cavidades de coletores solares, a fim de bloquear o fluxo de calor, e por conseguinte, diminuir a perda de calor pela convecção interna. Essas barreiras, por sua vez, não podem ser de materiais opacos, para não bloquear a radiação incidente nas placas de absorção.

Essas barreiras possuem diversas geometrias e materiais usadas para a sua confecção. Elas têm por objetivo aumentar o isolamento sem reduzir drasticamente a transmissão de radiação solar e são chamadas de sistemas de isolamento transparente ou *Transparent Insulation Material (TIM)* nas literaturas científicas.

Wong et al. (2007) mostraram em seu trabalho vários tipos de materiais utilizados na confecção de sistemas de isolamento transparente (TIM) e analisaram o retorno financeiro destas aplicações nas mais diversas geometrias. Os autores enfatizaram a relevância de utilizar sistemas de isolamento transparente em coletores solares a fim de aumentar a eficiência dos mesmos, com destaque para regiões mais frias. Wong et al. (2007) dividiram em quatro grupos os diversos esquemas pos-

síveis de utilização de isolamento transparente, em relação ao seus aspectos construtivos. A Figura 23 ilustra os grupos, conforme breve explicação a seguir.

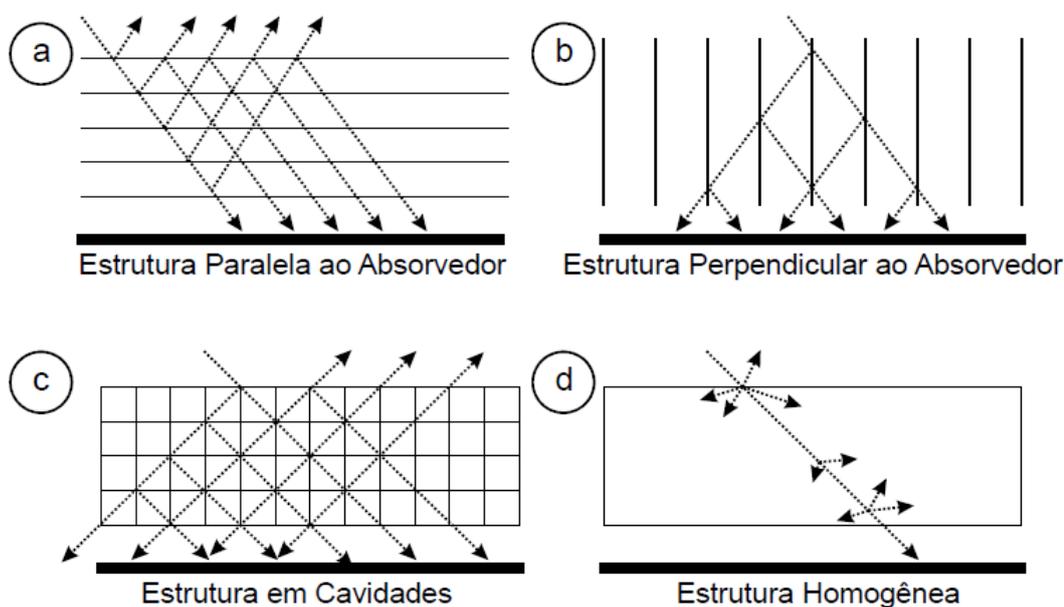
(a) **Barreiras paralelas à placa absorvedora:** como já se subentende, este grupo está associado a sistemas de isolamento que possuem barreiras paralelas à placa de absorção, conforme Figura 23a. Desta forma, diminui-se a espessura da cavidade, além de aumentar o número de cavidades. Um exemplo deste grupo são as placas com dupla cobertura de vidro. A desvantagem está associada a radiação ter que transpassar mais de uma superfície até chegar a placa de absorção.

(b) **Barreiras perpendiculares à placa absorvedora:** como já se subentende, este grupo está associado a sistemas de isolamento que possuem barreiras perpendiculares à placa de absorção, conforme Figura 23b. Desta forma, diminui-se o espaço em que o ar pode circular, minimizando a perda de calor por convecção.

(c) **Barreiras estruturadas:** são barreiras que possuem uma geometria estruturada, conhecida em literaturas como *honeycomb*, conforme Figura 23c. Existe uma gama de possibilidades de formas (quadradas, redondas, hexagonal, etc). A desvantagem destes formatos está associada à degeneração deste material ao longo do tempo de operação dos coletores, haja visto que, na maioria dos casos, estas barreiras estruturadas são feitas de plásticos, que por sua vez possuem um baixo ponto de fusão.

(d) **Barreiras de aerogel:** são barreiras compostas por aerogel que é um material sólido com densidade extremamente baixa, alta transparência. Desta forma, este tipo de material substitui toda a cavidade de ar e o vidro, conforme Figura 23d. A desvantagem destas barreiras está associada a absorção parcial da radiação solar pelo aerogel à medida que a mesma penetra no material.

Figura 23: Diferentes esquemas de isolamento transparente.



Fonte: Adaptada de Wong et al. (2007).

Considerando esta classificação, [Hirasawa et al. \(2013\)](#) utilizaram uma barreira estruturada feita de telas *nylon* com 0,05 mm de diâmetro espaçadas em 2 mm e observaram uma redução líquida da perda de calor por convecção natural de 7% para uma temperatura da superfície absorvedora de 100 °C. Os autores [Baetens et al. \(2011\)](#) e [Cuce et al. \(2014\)](#) fizeram uma revisão sobre o estado da arte de materiais de aerogel, usados como TIMs, e identificaram que a desvantagem dos materiais de aerogel está vinculado ao seu custo. Porém, o crescimento de sua utilidade e o aumento da sua produção tenderá a diminuir o preço e, conseqüentemente, aumentar a sua viabilidade.

[Jia et al. \(2018\)](#) e [Sun et al. \(2018\)](#) direcionaram os seus estudos nos principais tipos de TIMs e suas características em termos de comportamentos térmicos e óticos, bem como os benefícios que podem ser obtidos através de sua aplicação. Embora, os estudos avaliaram as janelas de edifícios, eles podem ser utilizados para analisar o benefício da aplicação de TIMs em coletores solares por apresentar resultados da transmitância no espectro solar e o comportamento térmico e ótico de diferentes tipos de TIM.

Outra opção é a substituição do ar no interior da cavidade por outros tipos de gases. [Vestlund et al. \(2009\)](#) fizeram uma análise comparativa das perdas térmicas diferentes gases. Dióxido de carbono, argônio, criptônio e xenônio, além do ar foram avaliados. Os autores mostraram que pode-se conseguir uma significativa redução das perdas de calor substituindo o ar por outros gases. A desvantagem desse processo é a necessidade de estanqueidade do coletor e o custo dos gases.

Embora o foco desta pesquisa bibliográfica seja o levantamento sobre coletores solares planos, um estudo interessante é a pesquisa de [Horta & Collares \(2012\)](#), que analisaram a diminuição da perda convectiva de um coletor cilindro-parabólico com a inserção de barreiras verticais e a substituição do ar por outros gases. Os autores elaboraram um modelo numérico para essa avaliação, no qual os resultados mostraram que o uso de barreiras verticais com o gás argônio apresentou melhores eficiências.

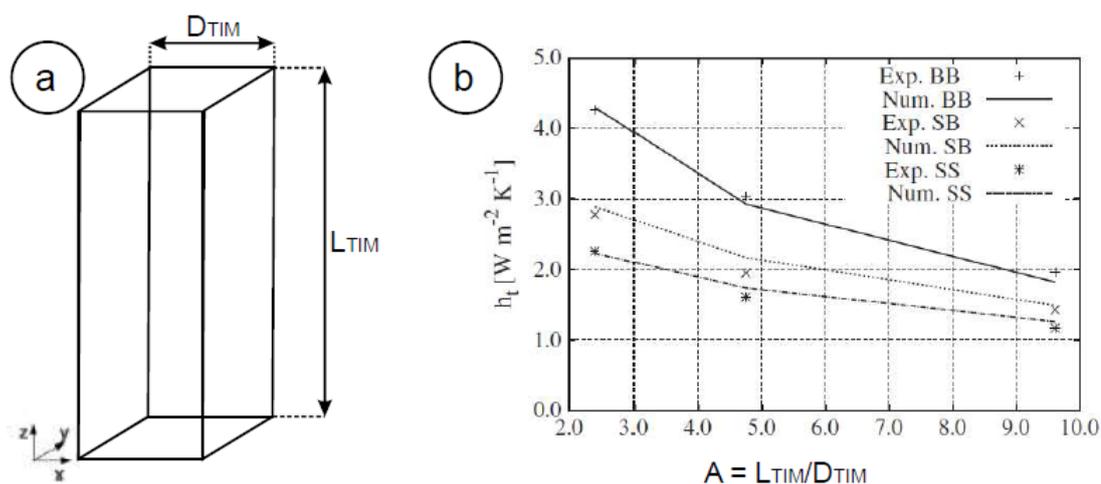
Outra utilização possível deste tipo de isolamento é aplicação em coletores híbridos (PVT), ou seja, em coletores solares que são térmicos e fotovoltaicos. [Hussain et al. \(2015\)](#) demonstraram que é possível obter um expressivo aumento da eficiência térmica, além da melhora na eficiência elétrica do sistema. [Osorio et al. \(2017\)](#) também aplicaram com sucesso sistemas de isolamento transparente em concentradores solares parabólicos. A aplicação deste tipo de isolamento em sistemas de alta temperatura demanda maior cuidado com a sua integridade estrutural [Rommel & Wagner \(1992\)](#) mostraram sistemas construídos com tubos capilares de vidro que permitiram a aplicação em uma temperatura de estagnação de 261°C. [Peuportier & Michel \(1995\)](#) realizaram um estudo experimental com aplicação de TIM em sistemas de aquecimento passivo em *trombe walls* e verificaram aumentos de eficiência da ordem de 25%.

[Wong & Eames \(2015\)](#) apresentaram modelos matemáticos desenvolvidos para calcular o desempenho óptico de um sistema de isolamento transparente, em diferentes ângulos de incidência.

O sistema modelado consistia em uma placa de vidro externa de 6 mm, uma sessão de células capilares de polimetilmetacrilato (PMMA) de 22 mm de largura e uma placa de vidro interna de 8 mm. A metodologia do cálculo foi razoável, visto que os resultados da transmitância solar calculada foi consistente com os resultados experimentais. Este método também pode ser adaptado para outros tipos de sistemas que utilizam vidro e possivelmente para coletores solares.

Kessentini et al. (2014) realizaram uma avaliação numérica para verificar a transferência de calor na cavidade de coletores solares, com a utilização de sistemas de isolamento transparente (TIM). A Figura 24a mostra a geometria do TIM e a Figura 24b apresenta os resultados da avaliação numérica de Kessentini et al. (2014) comparados com a correlação empírica de Hollands (1965). Marcus (1983) realizaram uma avaliação numérica parecida com a de Kessentini et al. (2014), com outros esquemas TIMs.

Figura 24: (a) Geometria do TIM e (b) curva do coeficiente convectivo em relação a proporção do TIM.



Fonte: Adaptada de Kessentini et al. (2014).

Em ambos os estudos de Wong & Eames (2015), Kessentini et al. (2014) e Marcus (1983) verificaram a diminuição do coeficiente convectivo com o uso de sistemas de isolamento transparente em coletores solares. Um resultado interessante que pode ser verificado na Figura 24 é a diminuição do coeficiente convectivo com o aumento da proporção do TIM em termos de  $L_{TIM}/D_{TIM}$ .

Riffel et al. (2009) compararam experimentalmente o uso de material isolante transparente (TIM) com um filme de polímero fluorescente (Teflon) e cobertura de vidro duplo em um coletor solar. Os autores obtiveram resultados do valor médio de transmitância, nos quais se verificou o resultado de 0,70 para vidro duplo, 0,63 para o Teflon e 0,48 para a cobertura TIM, demonstrando também a eficácia do uso de TIM em coletores solares.

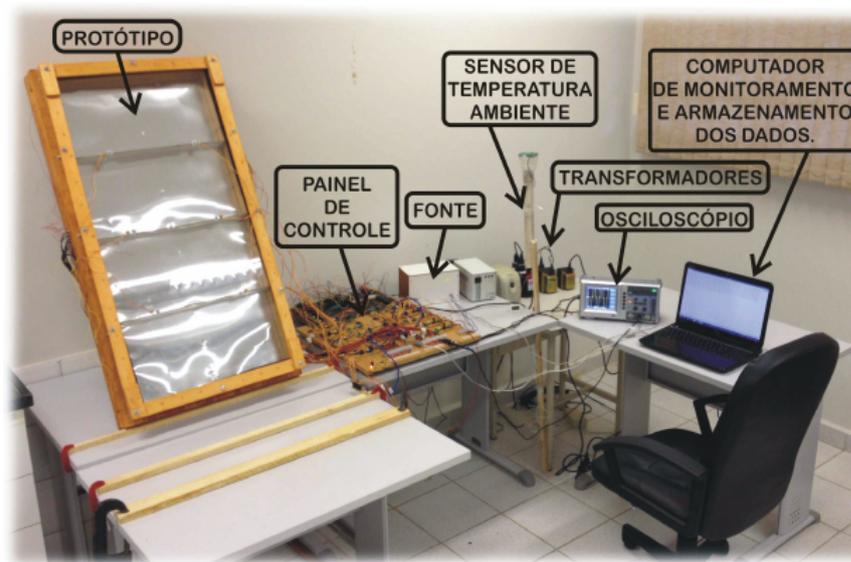
Bentivenha (2005) fez uma análise em coletores solares de placa plana, introduzindo barreiras verticais na cavidade de um coletor e comparando com um outro coletor sem modificação.

Entendeu-se que o seu objetivo era que as barreiras funcionassem como "aletas", tanto que o autor chamou as barreiras de "aletas". Porém, os seus resultados apresentados mostraram que a configuração adotada provocou uma diminuição da eficiência.

A pesquisa Garcia (2014) foi a base para o desenvolvimento do presente estudo, na qual investigou-se a influência do coeficiente convectivo do interior de uma cavidade, com as mesmas características de um coletor solar, ao adicionar barreiras perpendiculares. Esta análise teve um enfoque experimental, empírico e numérico.

No experimento, analisou-se um protótipo, com a base da cavidade feita de uma placa de alumínio de 0,1 mm de espessura. O fluxo de calor de entrada na cavidade não era fornecido por radiação solar, mas fornecido por resistências (fio de kanthal) fixadas na parte inferior da placa de alumínio. A potência elétrica dissipada nas resistências foi controlada por um circuito eletrônico, a fim de que a placa mantivesse uma temperatura de 100°C. A temperatura em toda a placa manteve-se muito próxima da temperatura desejada, por conta das resistências estarem próximas umas das outras e pela espessura bem fina da placa. A Figura 25 mostra uma visão geral do experimento. (GARCIA, 2014)

Figura 25: Vista geral do experimento.



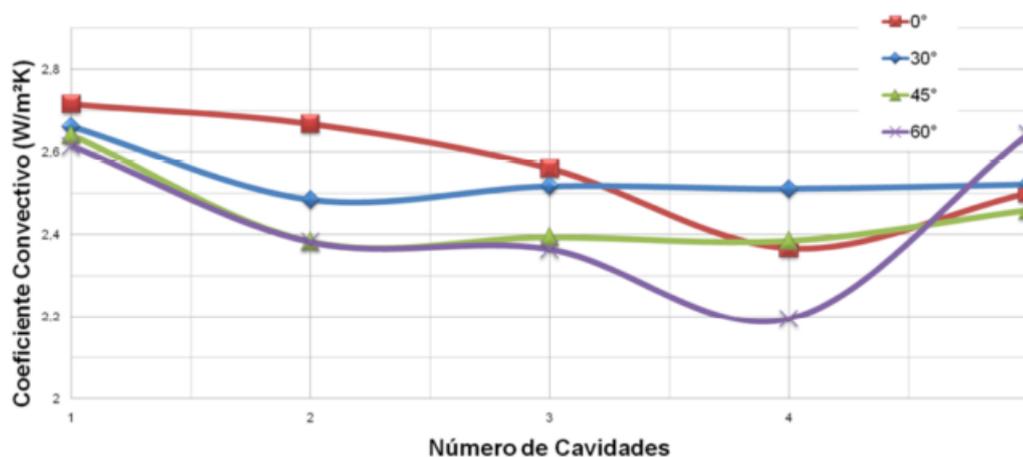
Fonte: Garcia (2014).

Na parte empírica, utilizou-se os resultados obtidos na parte experimental como valores de entrada na proposta de Hollands (1965), que é citada e encontrada em diversas referências, como destaca-se os estudos de Bergman & Lavine (2014) e Duffie & Beckman (2013). Na simulação numérica, realizada com o *software* OpenFOAM, foram criadas malhas que representassem as cavidades, além de usar as condições de temperatura obtidas nos experimentos com o protótipo.

Em Garcia (2014) pode-se verificar a variação do coeficiente de convecção em função do número de cavidades e com diferentes inclinações. Os resultados ilustrados na Figura 26, indicam

uma diminuição do coeficiente de convecção, apresentando um ponto ótimo, que por sua vez é diferente para cada inclinação.

Figura 26: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades, com inclinação de 0°, 30°, 45° e 60°.



Fonte: Garcia (2014).

Garcia (2014) também fez uma verificação do comportamento do coeficiente de convecção com a variação da inclinação e as quantidades de cavidades. Verificou-se uma ligeira redução do coeficiente de convecção ao aumentar a inclinação da posição horizontal até o ângulo de 45°. De 45° a 60° houveram comportamentos diferentes para cada quantidade de cavidades.

Garcia (2014) também comparou o coeficiente de convecção natural médio experimental, empírico e numérico ao variar a inclinação do protótipo com uma cavidade, obtendo uma boa aproximação entre os resultados.

Nesse cenário, muitos autores constataram que o uso de TIMs para a otimização de coletores solares deve-se considerar muitos parâmetros tais como a escolha do material, dimensões e proporções. Em geral, existe um TIM ideal para cada situação como mostra Platzer (1992). Considerando a sua implementação, Edwards et al. (1976) e Hollands & Iynkaran (1985) mostraram que a presença de pequenas folgas na montagem não afetam a efetividade do uso de TIMs em coletor solar.

Após análise destes trabalhos apresentados verificou-se que existem possibilidades de otimizar os coletores solares com o uso de sistemas de isolamento transparente, a fim de aumentar a viabilidade econômica e técnica. A maioria desses estudos abordam isolantes estruturados com diferentes arquiteturas. A estrutura de honeycomb é uma das mais comuns. Assim, esse trabalho pretende avaliar a influência da inclusão de barreiras horizontais como forma de isolamento transparente. O uso deste tipo de montagem pode ser usada com diferentes espaçamentos entre as barreiras. Garcia et al. (2013) mostraram, através de simulação numérica, que existe a formação de uma zona de baixa velocidade de recirculação em determinadas situações. A formação dessa região reduz o

coeficiente de transferência de calor entre a placa e o vidro, diminuindo a intensidade da convecção natural nessa região. Dessa forma, este trabalho se propôs a avaliar experimentalmente o impacto da presença de um número definido de barreiras na curva de eficiência de coletores solares planos modificados, dando continuidade a pesquisa de [Garcia et al. \(2013\)](#) e [Garcia \(2014\)](#), analisando o efeito do coeficiente convectivo interno de um coletor solar ao adicionar barreiras perpendiculares, por meio de coletores solares comerciais, a fim de verificar as reais influências desta metodologia, na eficiência destes equipamentos. Espera-se que os resultados obtidos possam colaborar na otimização destes equipamentos.

# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

Para o estudo da eficiência do coletor solar térmico foi necessário efetuar ensaios de desempenho térmico do aquecimento da água, conforme Norma Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). Para os ensaios construiu-se e instrumentou-se uma bancada de testes com sensores, controladores e monitoradores. A bancada foi montada no Laboratório de Termodinâmica, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP-FEB). Ao redor do local dos ensaios não há nenhum edifício, torre, poste, entre outros que venham a sombrear o coletor em algum horário do dia.

Para obter a eficiência de um coletor é necessário controlar um fluxo de água constante durante um determinado tempo. Neste mesmo intervalo de tempo deve-se monitorar as temperaturas de entrada e saída da água e a radiação incidente no coletor. Com esses parâmetros obtidos é possível calcular a eficiência do coletor, conforme será exemplificado no decorrer deste capítulo.

Serão apresentadas as etapas da metodologia em seções para facilitar o entendimento do processo adotado.

### 3.1 Bancada de ensaio

#### 3.1.1 Coletor

O coletor utilizado nos ensaios foi o modelo Trópicos Ômega V 200, fabricado pela Sólis Indústria e Comércio de Aquecedores Solar LTDA, mostrado na Figura 27. Este foi escolhido por ter características padrões de aquecedores de água residencias.

O modelo do coletor solar utilizado foi ensaiado por um laboratório credenciado para certificação destes tipos de equipamentos. O laboratório de ensaios pertence ao IPT, Instituto de Pesquisa Tecnológicas, no Laboratório de Instalação e Saneamento (CETAC), onde é emitido um relatório do ensaio de desempenho térmico, a qual contém, além das informações de geometria e materiais utilizados, a curva de eficiência em relação a área transparente, mostrado na Figura 28. Os coefici-

Figura 27: Coletor Solar Térmico de Placa Plana - Modelo Trópicos.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

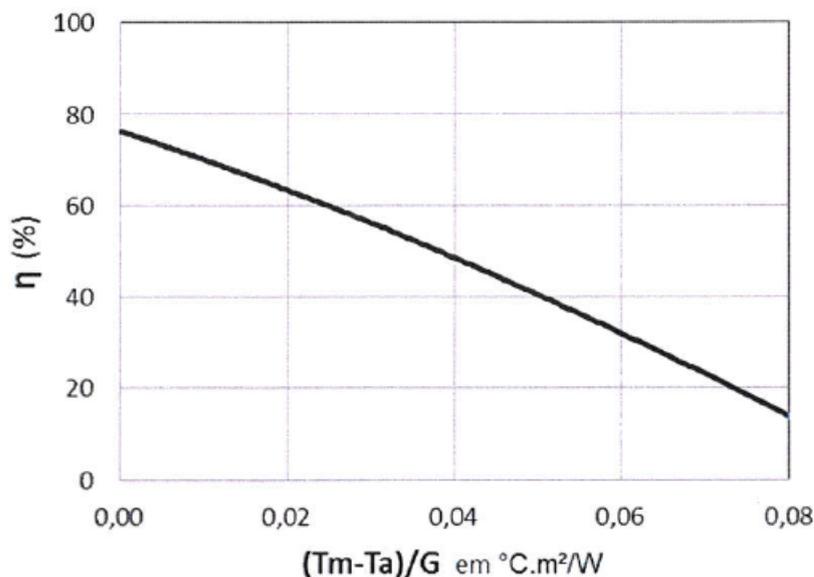
entes da curva de eficiência emitidos pelo relatório com algumas características importantes para a pesquisa estão apresentados na Tabela 1. O Anexo II contém o relatório de ensaio.

Tabela 1: Dados do coletor solar Trópicos, contidos no relatório de ensaio realizado pelo IPT.

Termo independente	$\eta_{0a}$	Adimensional	0,763
Coefficiente linear	$a_{1a}$	W/(m <sup>2</sup> .°C)	-6,056
Coefficiente quadrático	$a_{2a}$	W/(m <sup>2</sup> .°C <sup>2</sup> )	-0,027
Área transparente	$A_{col}$	m <sup>2</sup>	1,923
Incerteza da área medida	$I_{Acol}$	m <sup>2</sup>	0,004
Incerteza da eficiência térmica	$I_{\eta}$	%	0,6

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Figura 28: Gráfico da eficiência do coletor solar Trópicos, contido no relatório de ensaio realizado pelo IPT.



Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.1.2 Estrutura de apoio do coletor

O coletor foi apoiado num suporte que permitiu uma boa acomodação e instalação hidráulica das conexões de entrada e saída de água, possibilitando a passagem de ar pelas superfícies superior e inferior do coletor, conforme pode ser visto na Figura 29.

### 3.1.3 Ângulo de inclinação

O ângulo de inclinação do coletor é importante para que a radiação incidente seja maximizada, existindo um ângulo ótimo para cada latitude. Conforme Pereira (2001), o ângulo pode ser calculado pela equação

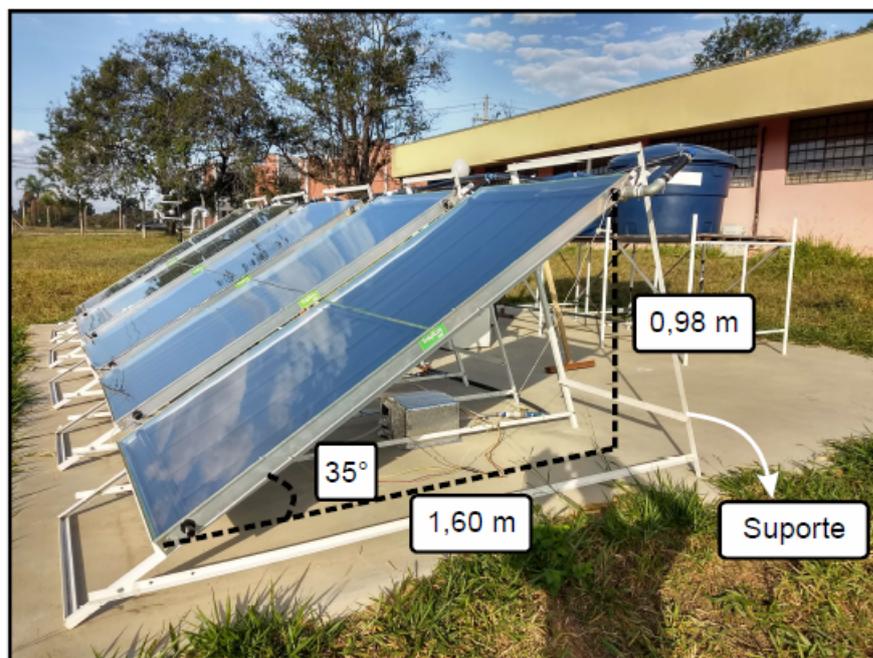
$$\beta = |\Phi| + 10 \quad (3.1)$$

onde  $\beta$ : ângulo de inclinação do coletor,

$\Phi$ : Latitude geométrica.

Calculando a equação 3.1 com a latitude da cidade de Bauru-SP ( $\Phi = -22,3154^{\circ}$ ), onde os testes foram realizados, obtém-se o valor de  $32,3^{\circ}$ . Para facilitar a construção do suporte dos coletores, a inclinação foi arredondada para o ângulo de  $35^{\circ}$ , seguindo a recomendação de Pereira (2001) e estando de acordo com a Norma Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). Na Figura 29 pode-se observar o suporte e inclinação do coletor.

Figura 29: Suporte e inclinação do coletor.

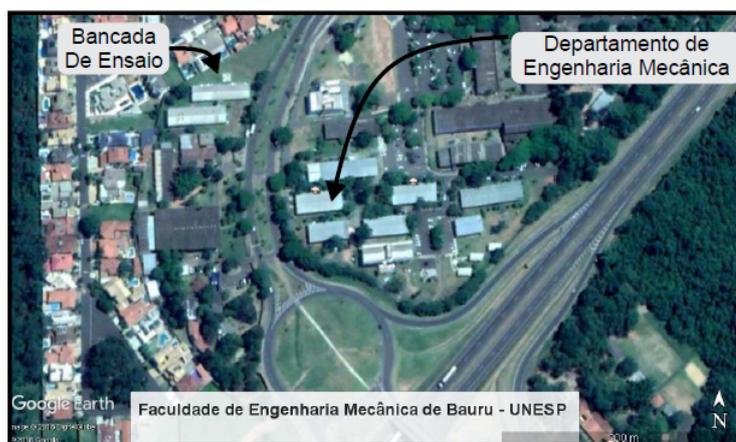


Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.1.4 Orientação do coletor

Assim como o ângulo de inclinação, a orientação para onde o coletor é direcionado também é importante para maximização da absorção da irradiação. Conforme descrito por Pereira (2001), para o hemisfério Sul, deve ser direcionado os coletores para o Norte Geográfico, direção usada nos testes. A Figura 30 mostra a localização e orientação cartográfica usando o *software Google Earth*.

Figura 30: Localização e orientação cartográfica da bancada de ensaio.

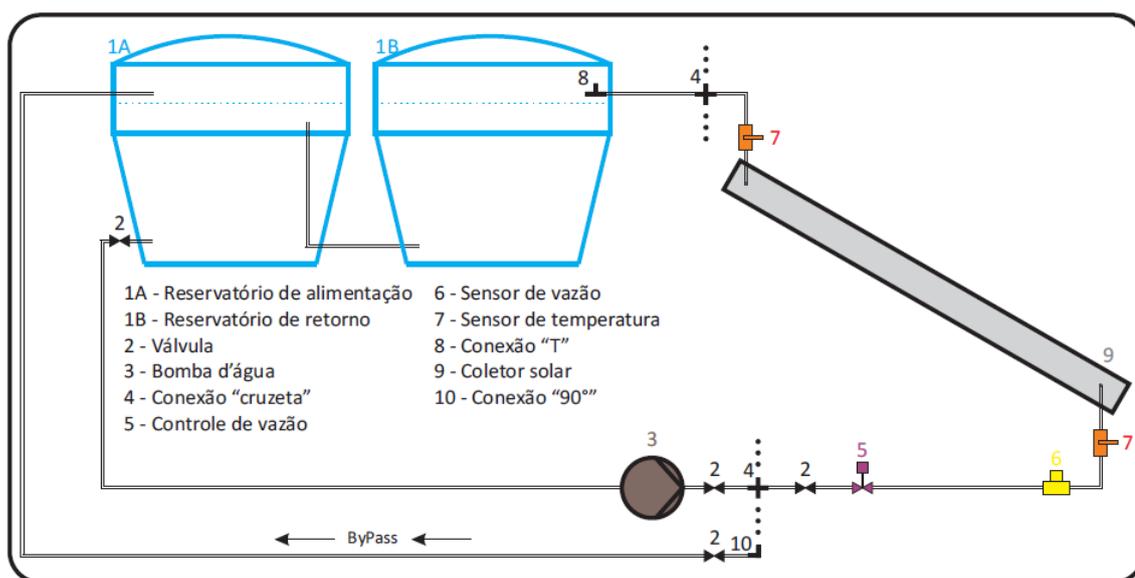


Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.1.5 Conexões hidráulica

Tubos de polietileno de baixa densidade, na cor negra, com diâmetro de 1 polegada e marca Edem foram usados para escoamento da água de entrada e saída do coletor, além de válvulas e conexões para a fixação com a bomba d'água, sensores e controladores. Após adequação da caixa d'água de alimentação e da bomba d'água, foram instaladas válvulas para efetuar a manutenção no sistema. A conexão "cruzeta", instalada após a bomba d'água, permitiu a instalação de outros coletores solares, ou seja, para cada coletor foi reproduzida as conexões entre as "cruzeta". A "cruzeta" foi instalada no coletor do meio e desta forma a bomba d'água foi utilizada para os cinco coletores. Uma válvula antes do controlador de vazão foi instalada para facilitar a manutenção e possibilitar um ajuste prévio da vazão, melhorando o controle e deixando a vazão um pouco acima da desejada. Entre o controlador e o sensor de vazão existe uma distância de 1,1 metros, equivalente a mais de 10 vezes o diâmetro da tubulação. Na Figura 31 pode ser vista uma ilustração da hidráulica utilizada com identificação dos principais componentes, outros sensores serão explanados e identificados no decorrer deste capítulo.

Figura 31: Esquema hidráulico da bancada de ensaio.



Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.1.6 Reservatório de água

Foram utilizadas duas caixas d'água de 500 litros como reservatório de água. Uma delas foi conectada à bomba d'água de alimentação do coletor e outra para o retorno da água do coletor. As duas foram interligadas entre a parte inferior da caixa de retorno com a parte superior da caixa de alimentação da água. As caixas foram posicionadas no nível mais alto do sistema hidráulico, garantindo o "afogamento" do coletor. Na tubulação de retorno foi instalada uma conexão T, onde

a conexão central ficou aberta e direcionada para cima, para expurgar o ar do sistema hidráulico. As caixas são mostradas na Figura 32.

Figura 32: Reservatórios e suas tubulações.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

### 3.1.7 Bomba d'água

A bomba utilizada para estabelecer o fluxo de água no coletor foi o modelo IDB-1/3, do fabricante Ferrari, com potência de 1/3 cv (250 W) e vazão máxima de 2100 L/h . Para não ter uma sobrecarga na bomba ao controlar pequenas vazões, utilizou-se um sistema de *by-pass*, conforme já ilustrado na Figura 31. A Figura 33 mostra o modelo da bomba que foi utilizada. No Anexo I o seu manual técnico é apresentado.

Figura 33: Bomba D'água.



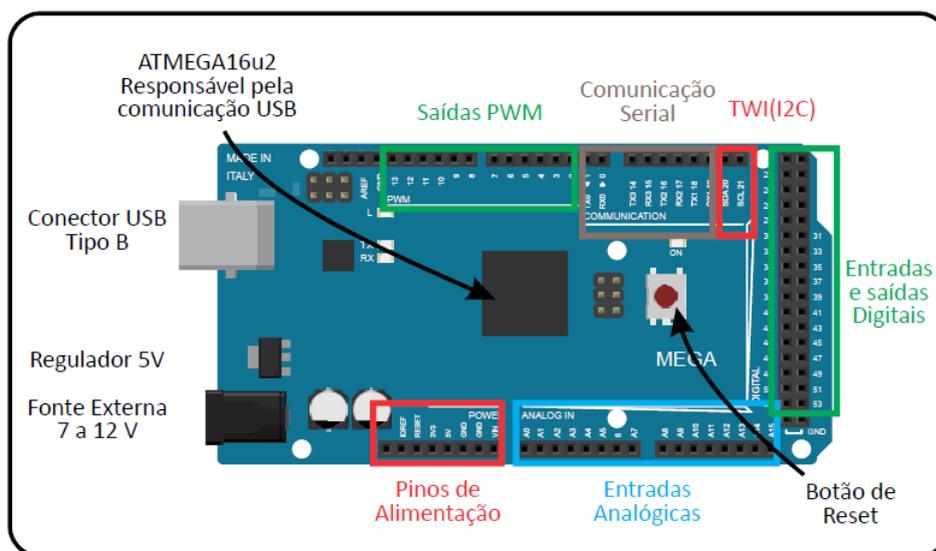
Fonte: *FERRARI lta* (2018)

## 3.2 Instrumentação e controle

### 3.2.1 Controlador

Para os ensaios foi necessário utilizar um processamento de monitoramento de vários sensores e controladores, além de armazenar os valores a cada ciclo da programação. Desta maneira, foi escolhida a placa de comando Arduino Mega, por possuir uma boa capacidade de processamento com o seu microcontrolador ATmega2560. Outra característica necessária foi a quantidade de portas digitais (54 com 14 saídas PWM) e analógicas (16). A Figura 34 mostra o controlador utilizado com as identificações de seus componentes.

Figura 34: Controlador Arduino Mega.

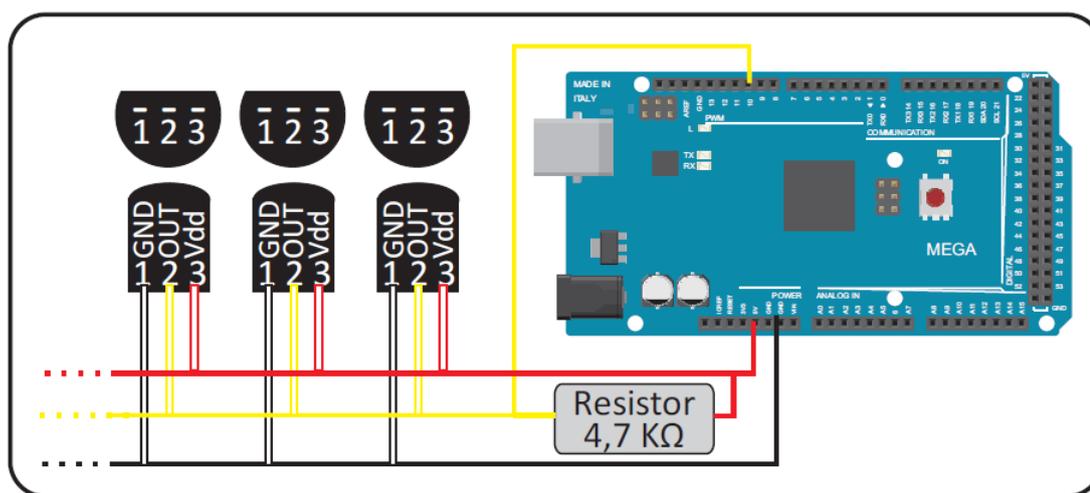


Fonte: *O próprio autor, 2019.*

### 3.2.2 Sensores de temperatura

A temperatura foi monitorada com o sensor digital de temperatura DS18B20. Este permite medir as temperaturas na faixa de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , tendo a faixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  uma precisão de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , sendo as temperaturas dos ensaios dentro desta faixa. O erro está na faixa de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . O sensor possui uma resolução de 9 a 12 bits. Sua alimentação é de 3,0 a 5,5 Volts, excelente para obter alimentações diretas dos controladores, não sendo necessário uma fonte externa. Outra grande vantagem deste sensor é que cada um possui um código serial de 64 bits, permitindo que múltiplos sensores sejam monitorados usando a mesma porta digital. Para isso é necessário que após a ligação dos sensores, seja executado um script de escaneamento dos endereços dos sensores. Ele possui três pinos de ligação, sendo eles o terra (gnd), a alimentação (5V) e o sinal (output). A Figura 35 mostra a ligação deste sensor com o Arduino.

Figura 35: Esquema de ligação do sensor de temperatura DS18B20 com o controlador Arduino Mega.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Para medir as temperaturas de entrada e saída da água nos coletores, foi adicionado um sensor DS18B20 com pasta térmica no interior de um tubo de cobre, que foi vedado por solda em uma das suas extremidades. Após a acomodação do sensor no interior do tubo de cobre, o mesmo foi fixado no interior de uma luva, com tamanho de uma polegada e de aço galvanizado, através de um furo. Usou-se Durepox para vedar o espaço entre o tubo de cobre e o furo da luva. Estas etapas podem ser visualizadas na Figura 36.

Na medida da temperatura do nível superior da caixa de retorno, temperatura mais alta da caixa devido a densidade da água quente ser menor, utilizou-se o mesmo processo de fixação do sensor dentro do tubo de cobre. Neste caso, o tubo de cobre foi vedado na outra extremidade com silicone de alta temperatura. O tubo foi fixado com fita adesiva numa garrafa com ar, que funcionou como uma bóia, conforme Figura 37.

Figura 36: Etapas da confecção do sensor de temperatura para medir a temperatura da água.



Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.2.3 Sensor de temperatura ambiente

Com a instalação de um sensor DS18B20 centralizado no interior de um tubo de PVC, com a circulação do ar forçada por um *cooler*, foi monitorada a temperatura ambiente do ar. O tubo foi isolado com uma manta térmica para evitar interferência com o aquecimento através da radiação solar. O *cooler* foi colocado numa das extremidades, com o direcionamento do fluxo de ar no sentido da extremidade sem o cooler para a extremidade com o cooler, desta maneira, o ar não aqueceu ao passar pelo cooler antes da medição da temperatura. Duas conexões de 90° foram instaladas na parte superior para proteger o sensor de intempérie e chuva. As duas pontas foram

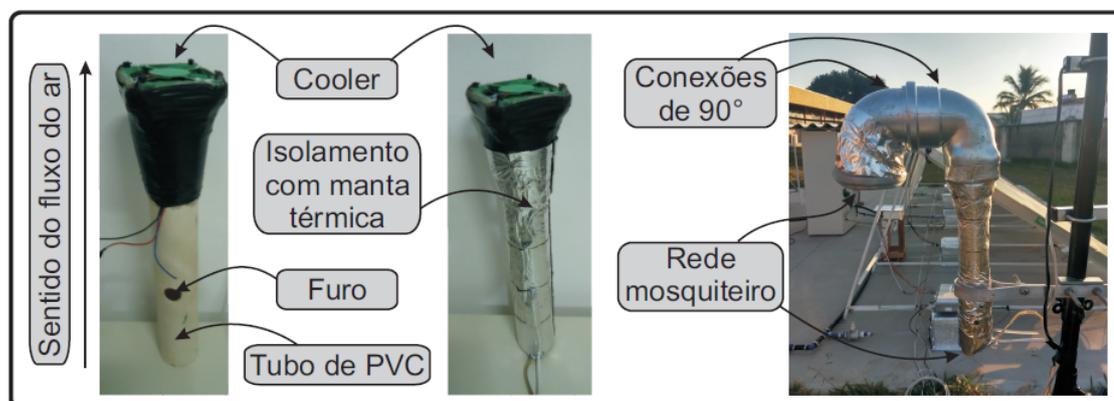
Figura 37: Flutuador com sensor de temperatura fixado.



Fonte: O próprio autor, 2019.

protegidas com rede de mosquiteiro para evitar a entrada de insetos e diminuir a poeira no interior do tubo. A Figura 38 ilustra a construção deste medidor.

Figura 38: Etapas da confecção do sensor de temperatura para medir a temperatura ambiente do ar.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

### 3.2.4 Piranômetro

Um dos piranômetros utilizados foi desenvolvido por estudos anteriores no mesmo laboratório de pesquisa onde a bancada de teste foi ensaiada, no Laboratório de Termodinâmica, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP-FEB). [Avallone et al. \(2018\)](#), [Garcia et al. \(2018\)](#) e [Pansanato et al. \(2018\)](#) são trabalhos precursores do desenvolvimento do piranômetro, sendo este último usado nos ensaios.

O piranômetro utilizado contém um sensor de temperatura colocado da mesma forma que o sensor de temperatura ambiente, comentado anteriormente, obtendo a temperatura do ar ambiente.

Um outro sensor de temperatura ficou exposto a radiação solar, sendo fixado numa chapa de alumínio de 20 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura para aumentar a área de absorção. A chapa de alumínio foi enegrecida com tinta Sumaterm com 95% de absorvidade.

Uma estrutura para fixar o sensor exposto a radiação foi impresso em uma impressora 3D, com material ABS. Para diminuir a perda térmica por convecção do sensor para o meio ambiente foi instalado um vidro na região superior ao sensor, de 53 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. Entre o vidro e o sensor existe um espaço com ar confinado, o qual se comporta como um isolante térmico. Por se tratar de uma pequena região, a perda de calor por convecção é reduzida.

O princípio do seu funcionamento foi vinculado a uma relação entre a radiação com a diferença de temperatura entre o sensor exposto a radiação com o sensor que monitorou a temperatura ambiente. A Figura 39 mostra as etapas de construção e detalhes deste projeto.

Também foi calibrado no mesmo período um piranômetro fabricado pela Fascitec Controla-

Figura 39: Etapas da confecção do sensor piranômetro.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

dores Eletrônicos LTDA, modelo SIR. O sensor contém um fotodiodo de silício com resposta de amplo espectro que converte a radiação incidente em corrente elétrica. O sensor pode ser visto na Figura 41.

Os sensores foram instalados do lado do piranômetro do IPMet – Centro de Meteorologia de Bauru, na cidade de Bauru-SP. O modelo do piranômetro é o CMP3, da Kipp e Zonen. Com os dados coletados, obteve-se a curva de calibração dos sensores e foi comparado com o sensor de radiação do IPMet. Foram coletados os dados do dia 07/04/2018. O erro padrão calculado pela curva de calibração do sensor térmico foi na ordem de  $9,03 \text{ W/m}^2$ . O Apêndice A mostra a curva de calibração de cada sensor. A Figura 40 mostra os sensores instalados no IPMet.

Os resultados da curva de calibração foram satisfatórios para os dois sensores, porém o piranômetro térmico, que utiliza os sensores de temperatura DS18B20, tem uma resposta mais próxima com os coletores térmicos, devido a inércia térmica. Desta forma, a radiação foi monitorada com os dois sensores, porém utilizou o piranômetro térmico para os cálculos dos ensaios.

A Figura 41 mostra o conjunto dos piranômetros instalados na bancada de ensaio, com a mesma inclinação do coletor, possibilitando assim a medida exata da radiação incidente.

O esquema de ligação elétrica com o controlador Arduino foi o mesmo usado com sensores DS18B20 para o caso do piranômetro térmico. O piranômetro SIR, utilizou uma entrada analógica do controlador Arduino, monitorando diretamente a voltagem gerada pelo piranômetro SIR. A ligação com o Arduino é mostrada na Figura 42.

Figura 40: Piranômetros instalados no IPMet.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

### 3.2.5 Sensor de vazão

O sensor utilizado para a monitoramento da vazão foi o YF-S201, sendo que seu funcionamento está atrelado a uma válvula no interior do sensor com um ímã acoplado, em formato de catavento, que trabalha em conjunto com um sensor de efeito Hall para enviar sinal PWM. O sinal é emitido em pulsos para o controlador.

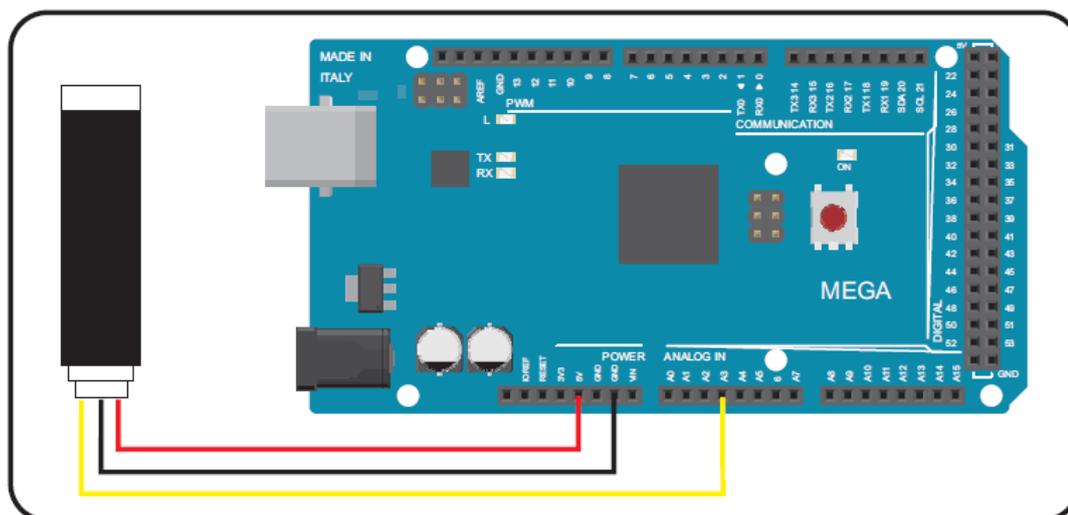
Antes dos ensaios, cada sensor de vazão foi calibrado. Para calibração adotou-se um reservatório com volume conhecido (1 litro) e registrou-se o tempo para encher o reservatório. Foram alteradas as vazões desde o fluxo mínimo, que possibilita a rotação da válvula do interior do sen-

Figura 41: Piranômetros térmico e o SIR instalados na bancada de ensaio.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

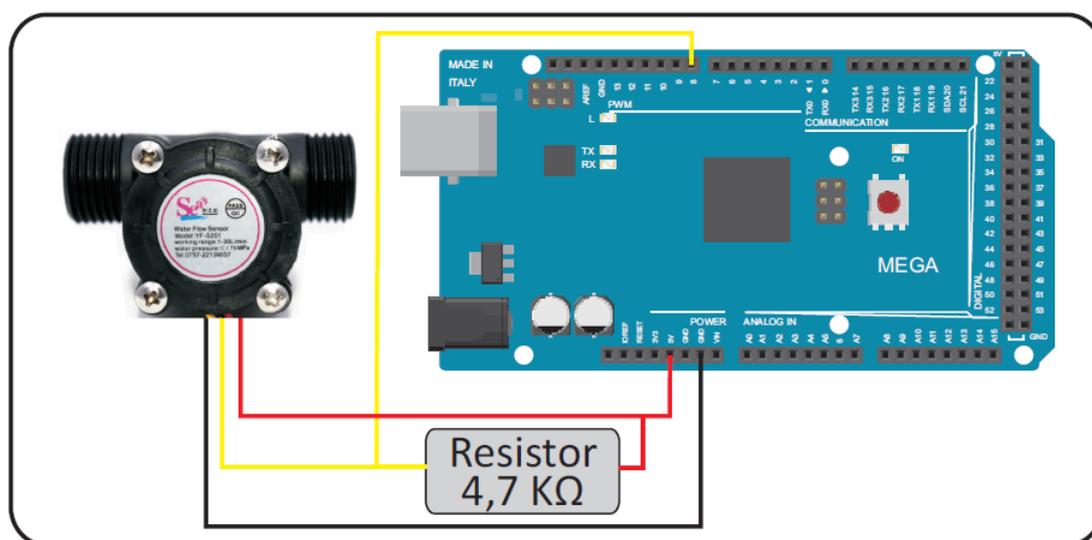
Figura 42: Esquema de ligação do sensor piranômetro SIR com o controlador Arduino Mega.



Fonte: O próprio autor, 2019.

sor, até o fluxo máximo de uma torneira ligada a rede da cidade de Bauru-SP. Para cada intervalo de vazão foram monitoradas 3 medidas e calculadas as médias das mesmas. Durante o preenchimento do reservatório, monitorou-se a quantidade de pulsos emitidos pelo sensor de vazão. Com o número total de pulsos com o preenchimento do reservatório, foi possível uma relação entre pulsos e a vazão. No Apêndice B contém as curvas de calibração dos sensores de vazão. A Figura 43 mostra o esquema elétrico da ligação do sensor com o Arduino. O erro estimado pelo fabricante está na ordem de 10%.

Figura 43: Esquema de ligação do sensor de vazão YF-S201 com o controlador Arduino Mega.

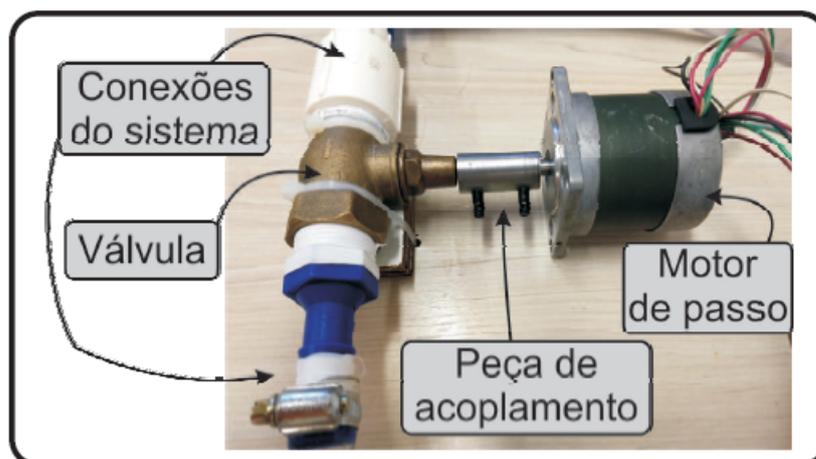


Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.2.6 Controlador de vazão

Devido a vazão ser um parâmetro fundamental no cálculo da eficiência de coletores solares, foi necessário controlar a vazão, além do monitoramento. Conforme Norma [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2009\)](#), a vazão do fluido deve ser ajustada a  $0,02 \text{ [kg/(s.m}^2\text{)]}$  da área do coletor, ou  $1,2 \text{ [L/(min.m}^2\text{)]}$ . Assim, foi desenvolvido um controle de uma válvula agulha, acoplando o seu eixo ao eixo de um motor de passo, conforme Figura 44.

Figura 44: Acoplamento do motor de passo com a válvula.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

O motor de passo é um componente eletro-mecânico que, através de pulsos elétricos, rotaciona o seu eixo com variações angulares discretas, a qual denomina-se cada incremento da sua rotação (passos). Os pulsos devem ser aplicados nos terminais do motor numa determinada sequência, que determina o sentido de rotação do motor. A velocidade de giro do motor está diretamente relacionada a frequência dos pulsos emitidos. (NIKU, 2013)

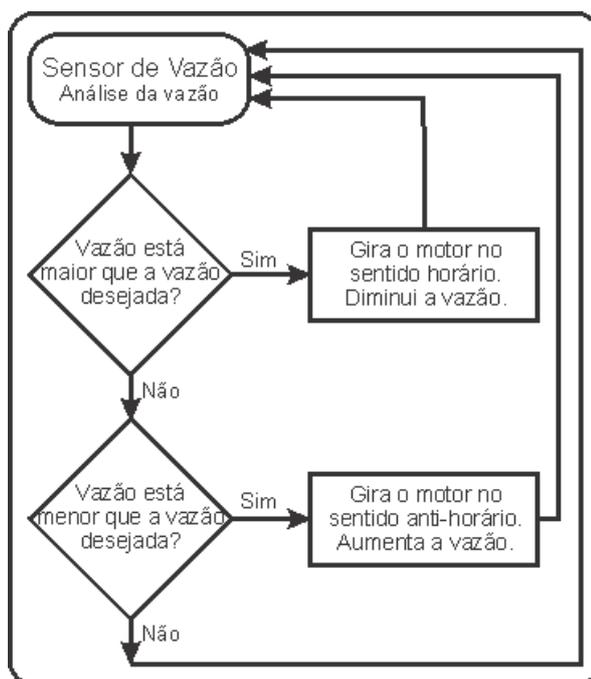
O controle foi realizado pelo controlador Arduino, que recebeu a informação do sensor de vazão e comparou com a vazão desejada, emitindo um sinal à placa de controle do motor de passo para fechar a válvula, girando o motor no sentido horário, caso a vazão esteja acima, ou o inverso, caso esteja a vazão a baixo da desejada, conforme fluxograma apresentado na Figura 45.

Dessa forma permitiu-se um controle proporcional integral derivativo (PID) da vazão. Dois testes foram realizados para verificar o funcionamento do equipamento desenvolvido. Um teste com a válvula totalmente fechada e outro totalmente aberta. O monitoramento destes testes podem ser vistos nas Figuras 46 e 47, respectivamente.

O esquema elétrico do controlador Arduino com o motor de passo é mostrado na Figura 48.

Para controlar o motor de passo foi desenvolvido um circuito eletrônico, que atuou no recebimento do sinal baixo do Arduino e reenvio do sinal para as bobinas do motor de passo, através de uma fonte (Output 12V-1A). O esquema do circuito elétrico da placa é mostrado na Figura 49.

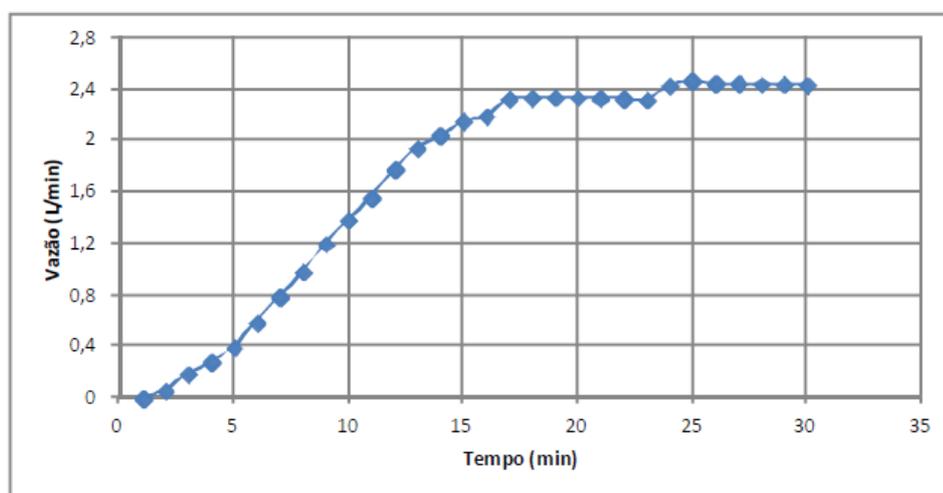
Figura 45: Fluxograma do controle de vazão.



Fonte: O próprio autor, 2019.

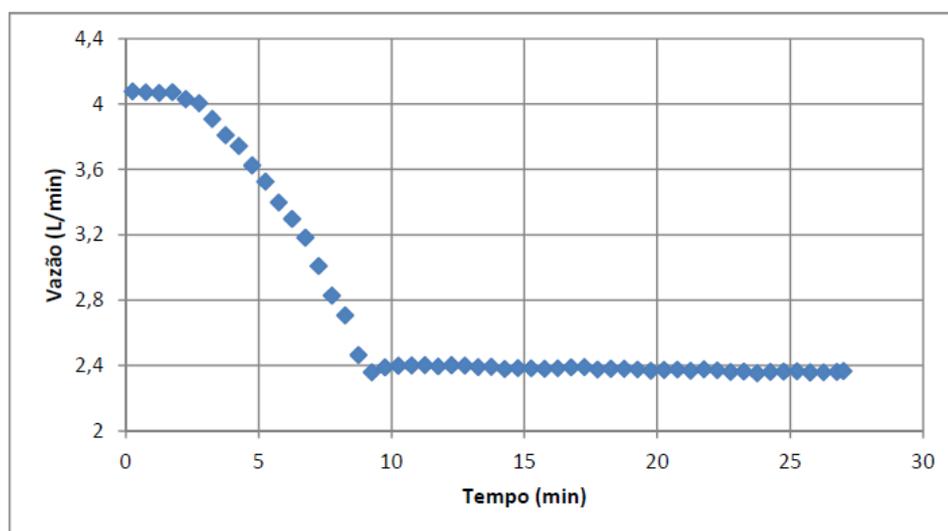
No desenvolvimento da placa utilizou-se o software Eagle (Versão 5.11). Com ele foi possível desenvolver o lay-out do circuito e imprimir numa folha de papel fotográfico a trilha a ser usada na placa. O desenho da trilha foi transferido para uma placa nova de circuito. Após emergir a placa num recipiente com solução de perclorato de ferro por alguns minutos, limpou-se a placa com palha de aço, retirando a tinta do toner. Foi perfurado os locais dos componentes eletrônicos, finalizando com a soldagem dos mesmos. As Figuras 50 e 51 mostram a imagem da trilha impressa

Figura 46: Gráfico do controle PID da vazão, iniciando com mínima vazão.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 47: Gráfico do controle PID da vazão, iniciando com máxima vazão.

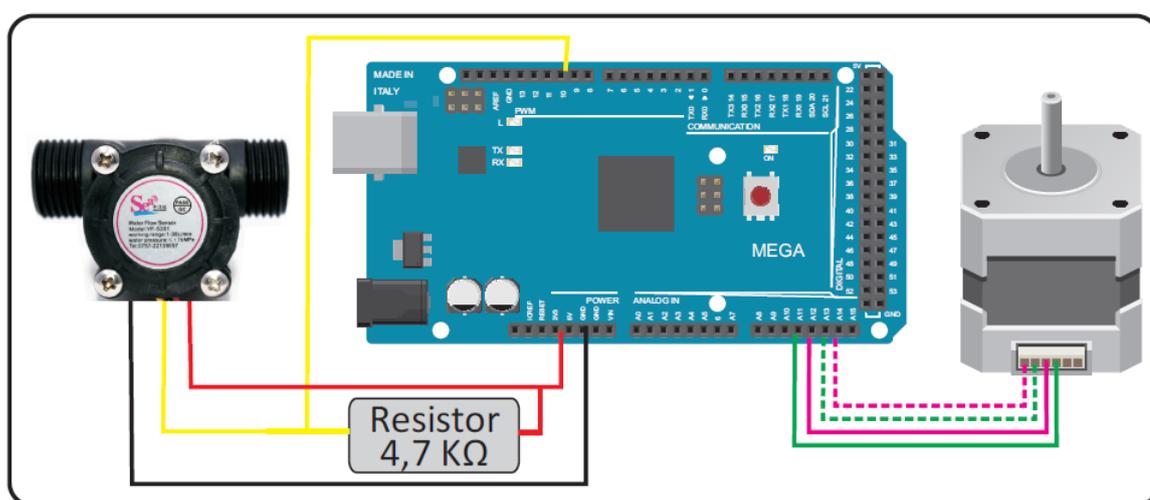


Fonte: O próprio autor, 2019.

no papel fotográfico e a trilha na placa, com os componentes já soldados, respectivamente.

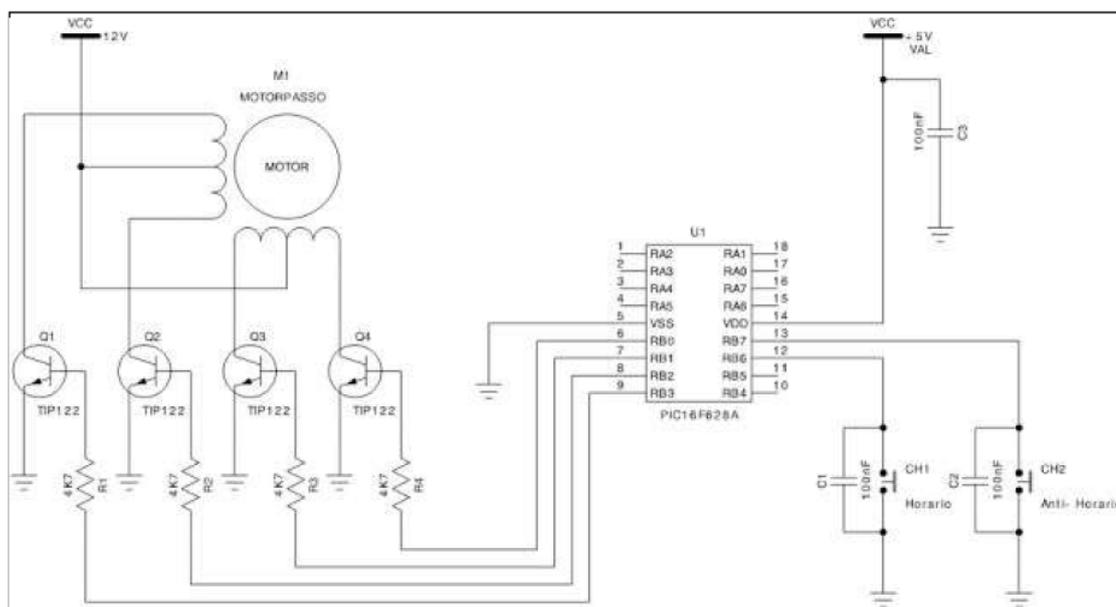
A acomodação de todos os equipamentos foi realizada numa madeira, com uma leve inclinação, para evitar que a placa tenha algum contato com água, caso ocorra algum vazamento, conforme Figura 52. Foi elaborada uma estrutura para a proteção da chuva e aquecimento devida a radiação solar, construída com chapa metálica de calha, envolvida com um manta térmica, conforme Figura 53.

Figura 48: Esquema de ligação do sensor de vazão YF-S201 e o motor de passo com o controlador Arduino Mega.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 49: Circuito eletrônico do controle de vazão.

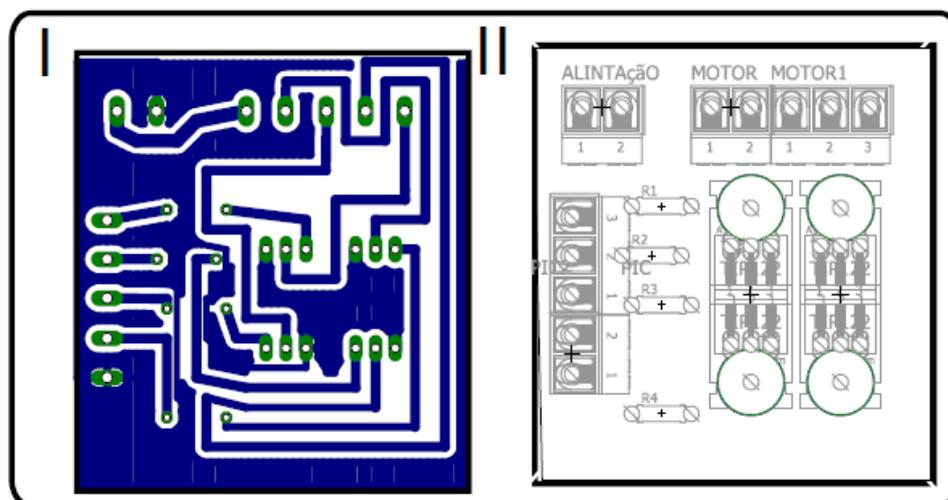


Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.2.7 Sensor de umidade relativa do ar

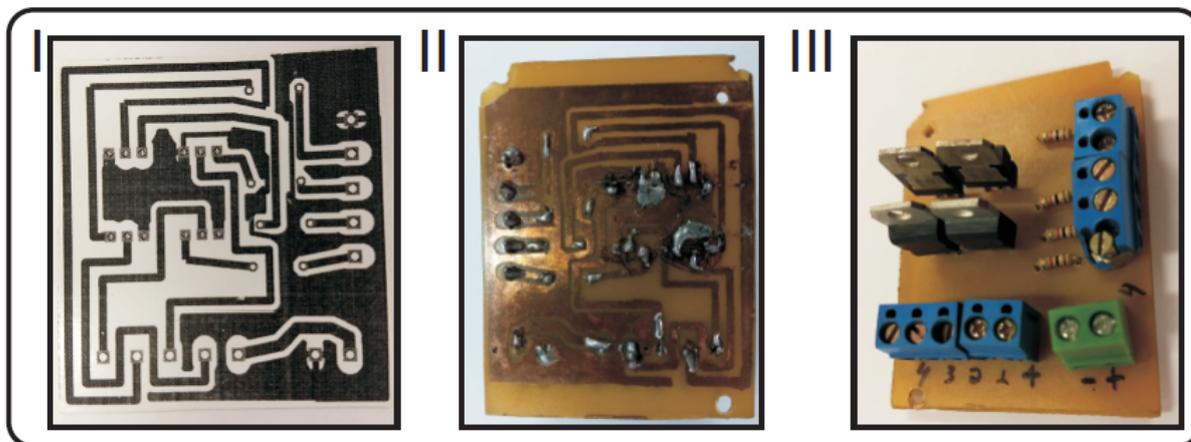
Analogamente ao monitoramento da temperatura ambiente, também utilizou-se uma tubulação de PVC e um cooler para forçar um fluxo de ar para monitoramento da umidade relativa. O sensor utilizado foi o DHT11 que possui uma faixa de medição de umidade de 20% a 90%. O esquema elétrico de ligação com Arduino é ilustrado na Figura 54.

Figura 50: Imagem da trilha (I) e dos componentes eletrônicos (II) gerado pelo software Eagle, para a placa do controle de vazão.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 51: Imagem da trilha em papel fotográfico, da trilha na placa de circuito impresso e dos componentes eletrônicos soldados na placa de circuito impresso da placa para controle da vazão.

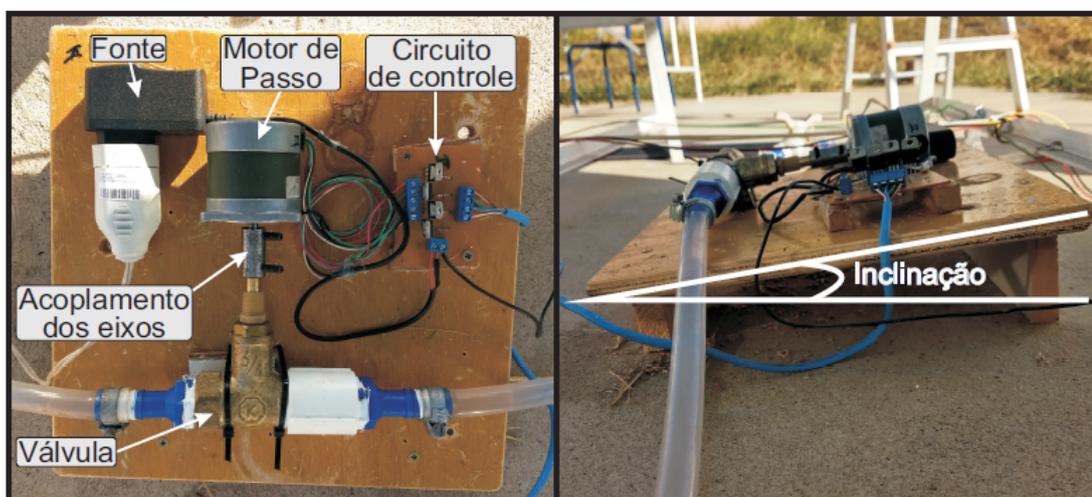


Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.2.8 Anemômetro

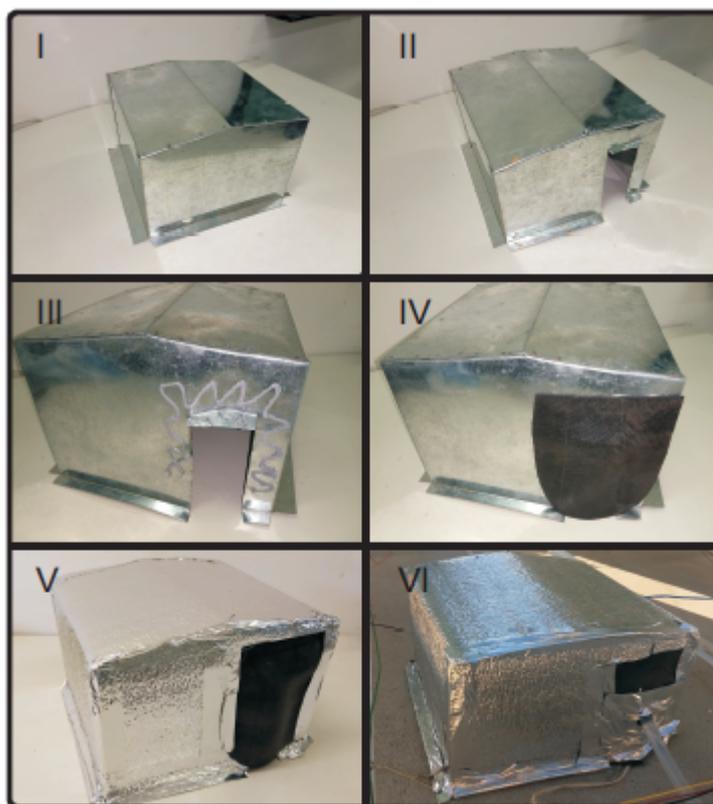
O anemômetro utilizado foi o do tipo conchas, que é um mecanismo composto por concha fixada numa barra que por sua vez está fixada a um rotor. Este possui três conchas que estão com a mesma orientação, girando na velocidade proporcional a velocidade do vento, sendo recomendado para velocidades médias e baixas. O seu funcionamento está associado a um *reed switch* ou interruptor de lâminas. Assim como o nome sugere, este equipamento funciona como uma chave que é acionada pelo campo magnético de uma bobina ou de um ímã, conforme Figura 55. Desta maneira, a cada volta completa, esta chave fecha o circuito, que emite um pulso ao controlador. O anemômetro possui um *reed switch* acoplado a barra de fixação e um ímã foi acoplado ao eixo

Figura 52: Distribuição dos equipamentos no conjunto do controle da vazão.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 53: Caixa de proteção do controle de vazão.



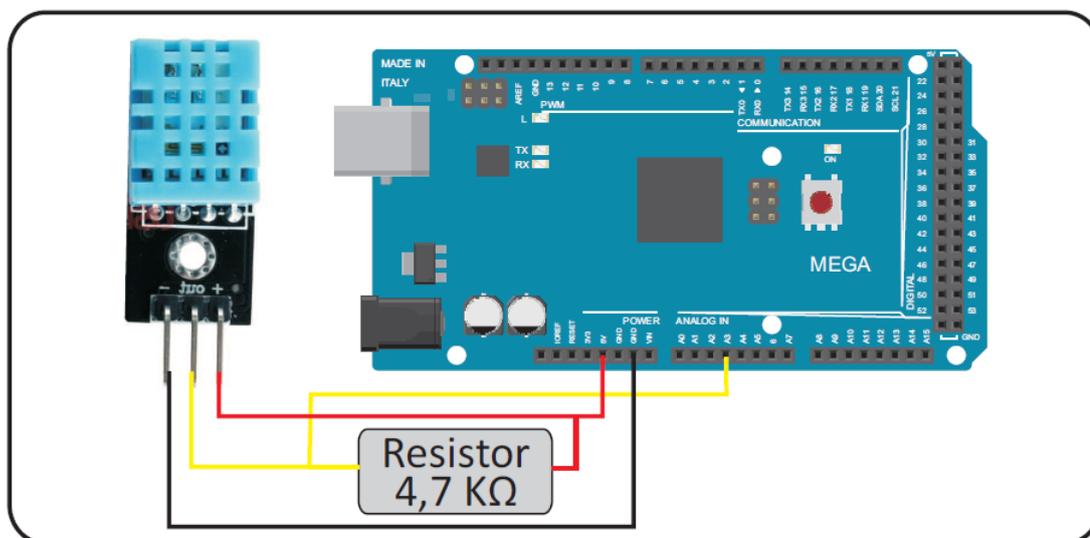
*Fonte: O próprio autor, 2019.*

móvel, conforme Figura 56. O anemômetro foi posicionado paralelamente ao coletor, medindo o fluxo de vento paralelo. A Figura 57 mostra o esquema elétrico da ligação do anemômetro com o Arduino.

### 3.2.9 Biruta - Sensor de direção do vento

O sensor de direção do vento contém 8 resistências, de  $10\text{k}\Omega$  a  $80\text{k}\Omega$ , variando em  $10\text{k}\Omega$ , correspondendo a direção de  $0^\circ$  ( $360^\circ$ ) a  $315^\circ$ , variando em  $45^\circ$ . O sensor foi ligado em série com uma resistência de  $4,7\text{k}\Omega$ , conforme Figura 58. O sinal monitorado foi vinculado a tensão aplicada na resistência constante. Desta maneira, ao variar-se a direção, há uma mudança da resistência equivalente do circuito, que por sua vez altera o valor da potência dissipada na resistência monitorada e o valor medido pela entrada analógica. A entrada A/D do Arduino possui uma resolução de 10 bits, a qual retorna um valor na faixa de 0 a 1023, conforme Tabela 2. A Figura 59 mostra o esquema elétrico usado.

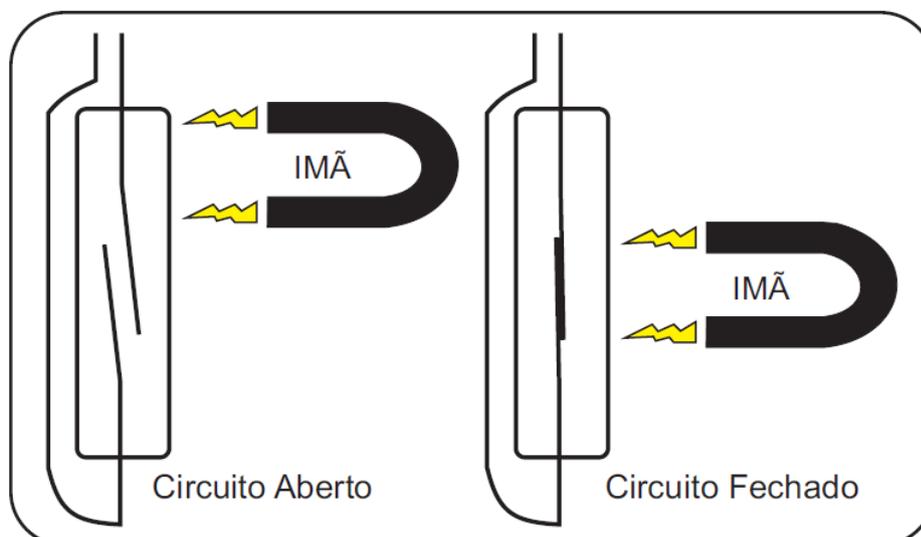
Figura 54: Esquema de ligação do sensor de umidade DHT11 com o controlador Arduino Mega.



Fonte: O próprio autor, 2019.

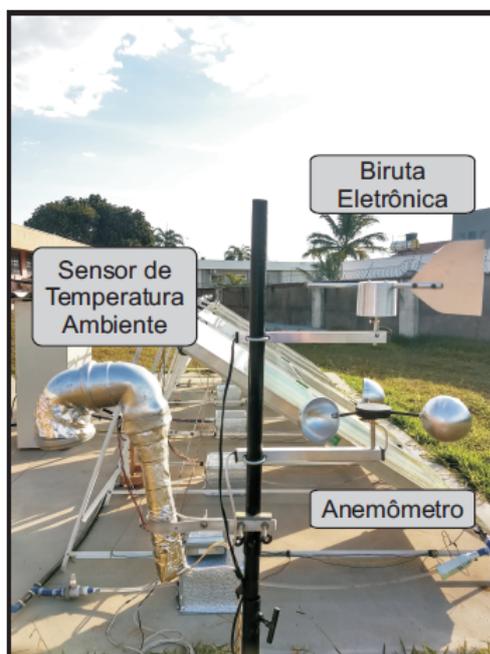
### 3.2.10 Módulo de memória Flash

Os dados monitorados pelo controlador Arduino foram salvos a cada ciclo de controle num cartão de memória microSD. O cartão foi acoplado no *slot* de um *shield* para Arduino Mega, o *shield* Gravity, conforme Figura 60. Inicialmente, usou-se um módulo de cartão de memória, mostrado na Figura 61, que funcionou com o Arduino Uno, mas não funcionou quando foi conectado ao Arduino Mega, por isso foi utilizado o *slot* microSD do *shield* Gravity. A Figura 61 mostra o esquema elétrico de conexão do módulo SD com o Arduino, tal conexão representa a mesma "pinagem" usada no *shield* Gravity.

Figura 55: Funcionamento do *reed switch*.

Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 56: Estação meteorológica (temperatura ambiente, biruta e anemômetro).

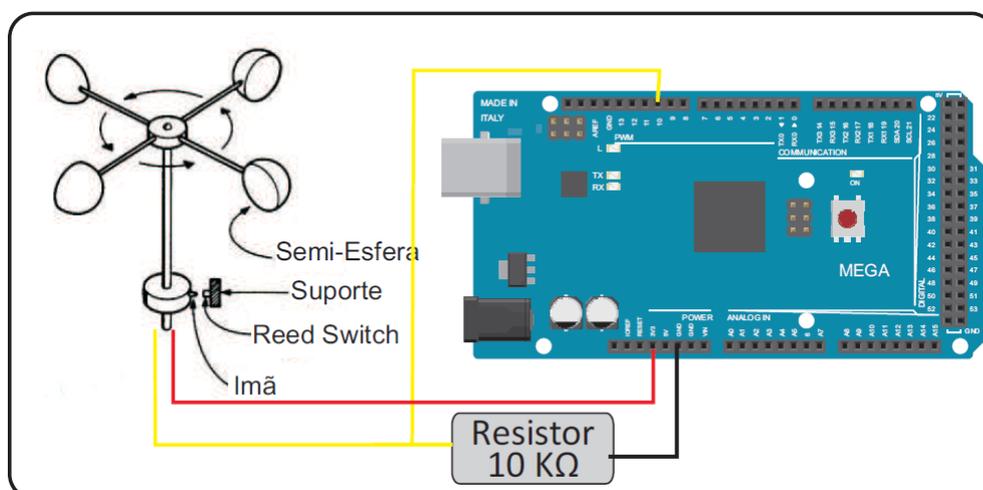


Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.2.11 Caixa de controle

Para facilitar o entendimento, em cada capítulo foi apresentado como cada componente foi ligado ao controlador Arduino Mega. No ensaio, todos os componentes foram ligados ao Arduino Mega simultaneamente. Para isso, foi construído uma caixa de controle com plugues, para facilitar a ligação de todos equipamentos, conforme Figura 62. A Tabela 3 mostra a listagem das portas analógicas e digitais usadas com os respectivos componentes eletrônicos.

Figura 57: Esquema de ligação do sensor de anemômetro com o controlador Arduino Mega.



Fonte: O próprio autor, 2019.

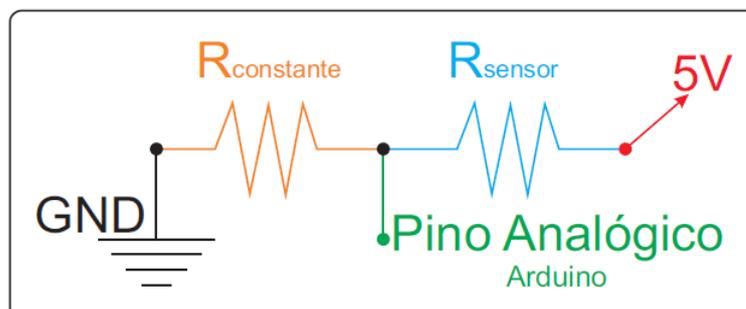
Tabela 2: Valor da tensão, direção e posição em relação ao valor da resistência do anemômetro.

Resistência do Sensor	Tensão	Leitura (0 a 1023)	Direção (Graus)	Posição (Cardeal)
10	1,59	327	0° $\equiv$ 360°	Nordeste
20	0,94	195	45°	Este
30	0,66	139	90°	Sudeste
40	0,51	108	135°	Sul
50	0,42	88	180°	Sudoeste
60	0,35	74	225°	Oeste
70	0,3	64	270°	Noroeste
80	0,26	57	315°	Norte

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

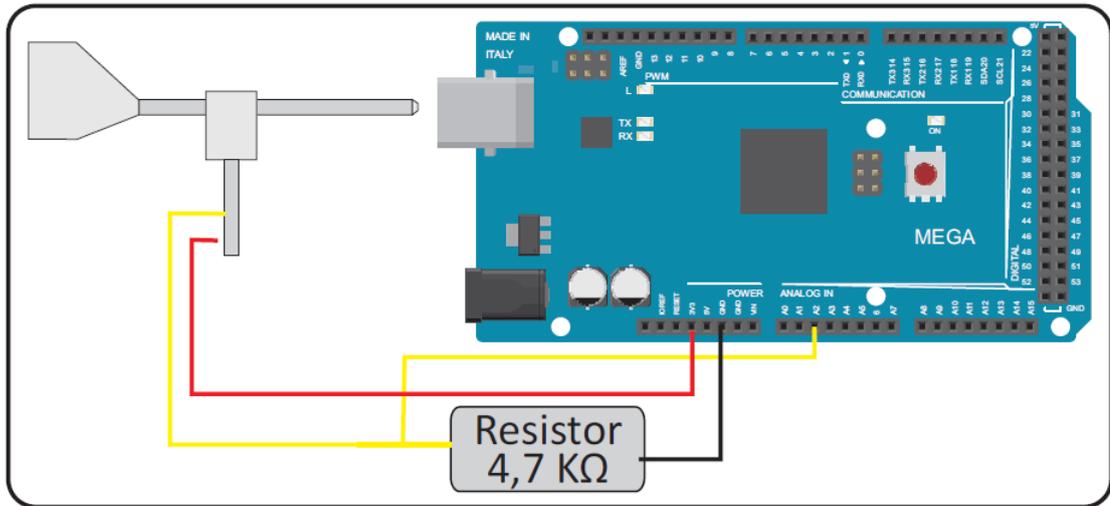
Uma estrutura de proteção dos intempéries do tempo foi construída para alocar a caixa de controle e a bomba d'água, a estrutura pode ser vista na Figura 63.

Figura 58: Esquema do circuito eletrônico da biruta eletrônica.



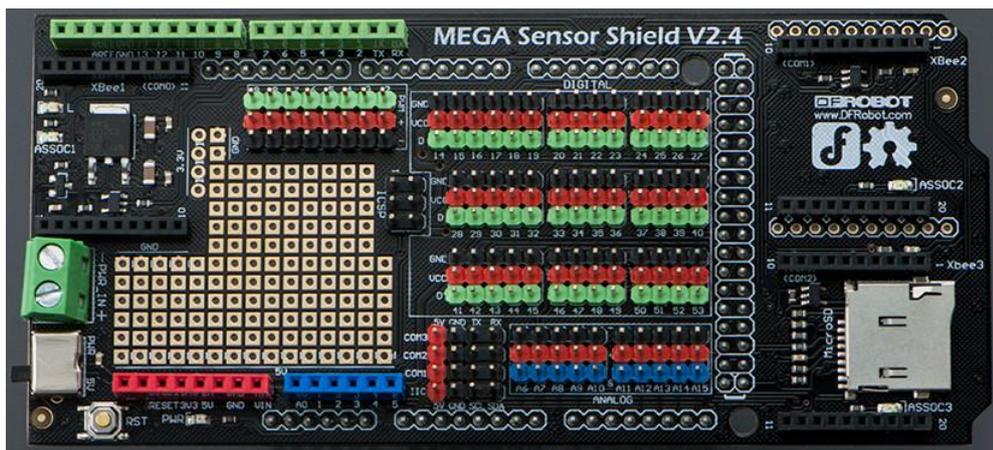
*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Figura 59: Esquema de ligação do sensor de velocidade do vento com o controlador Arduino Mega.



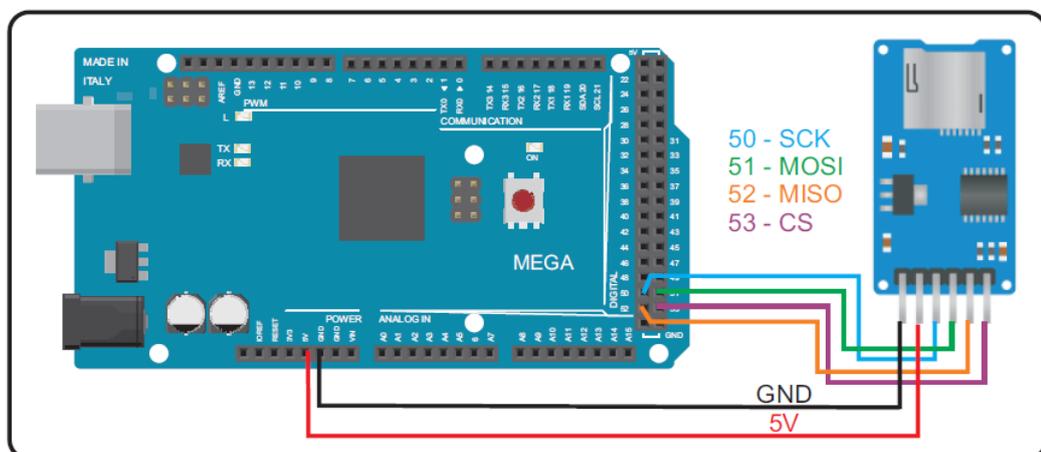
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 60: Placa eletrônica Shield Gravity.



Fonte: Gravity (2018)

Figura 61: Esquema de ligação do módulo SD com o controlador Arduino Mega.



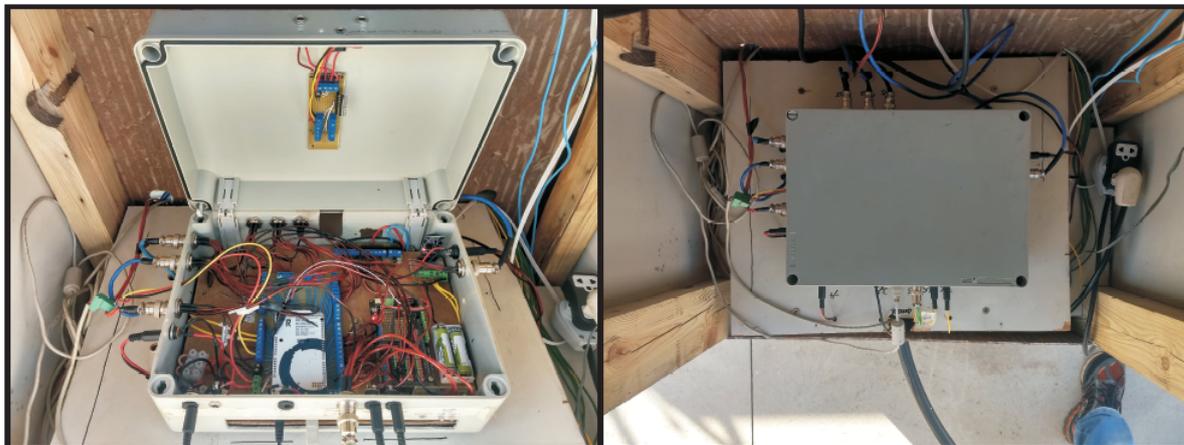
Fonte: O próprio autor, 2019.

Tabela 3: Listagem das portas A/D usadas.

Nº da Porta	Porta Analógica	Porta Digital	Nº da Porta	Porta Analógica	Porta Digital
0	Direção do vento	——	24	——	Controle de Vazão 02
1	Piranômetro	——	25	——	Controle de Vazão 02
2	Sensor DHT	——	27	——	Controle de Vazão 03
3	——	Sensor de vazão 01	29	——	Controle de Vazão 03
4	Relógio (SDA)	Sensor de vazão 02	31	——	Controle de Vazão 03
5	Relógio(SCL)	Sensor de vazão 03	33	——	Controle de Vazão 03
6	——	Sensor de vazão 04	35	——	Controle de Vazão 04
7	——	Sensor de vazão 05	37	——	Controle de Vazão 04
8	——	Anemômetro	39	——	Controle de Vazão 04
10	——	Sensores de Temperatura	41	——	Controle de Vazão 04
11	——		43	——	Controle de Vazão 05
11	——	Buzzer	45	——	Controle de Vazão 05
13	——	LED Verde	47	——	Controle de Vazão 05
18	——	Controle de Vazão 01	49	——	Controle de Vazão 05
19	——	Controle de Vazão 01	50	——	Cartão SD (MISO)
20	——	Controle de Vazão 01	51	——	Cartão SD (MOSI)
21	——	Controle de Vazão 01	52	——	Cartão SD (SCK)
22	——	Controle de Vazão 02	53	——	Cartão SD (CS)
23	——	Controle de Vazão 02			

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Figura 62: Caixa de controle.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 63: Estrutura de proteção da bomba d'água e caixa de controle.

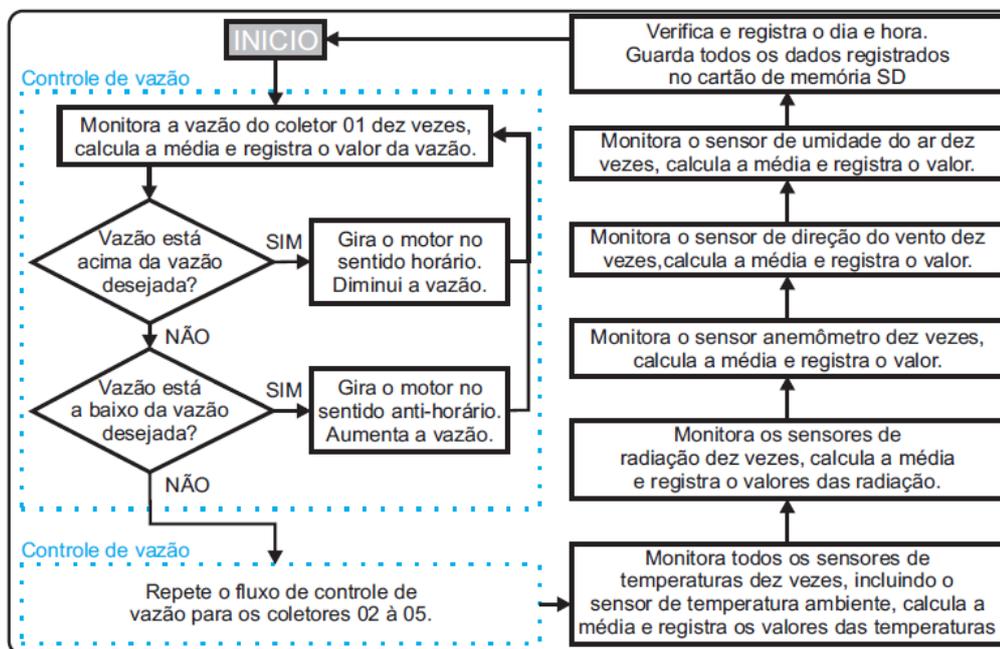


Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.3 Metodologia dos ensaios

Como o objetivo da pesquisa foi avaliar os coletores com uma a quatro barreiras e compará-los com um coletor padrão, ou seja, sem barreira, e como os ensaios foram realizados em ambiente aberto e com radiação solar exposta a condições ambientais, a bancada de ensaio foi projetada para efetuar testes com 5 coletores simultaneamente. Desta maneira, foi garantida uniformidade da incidência de radiação. Com isso, despendeu-se grande parte do tempo da pesquisa, no desenvolvimento do sensoriamento das cinco bancadas, da caixa de controle com todos os plugues e do algoritmo de programação do controlador Arduino Mega, apresentado no Apêndice C. O fluxograma simplificado do algoritmo é mostrado na Figura 64.

Figura 64: Fluxograma da programação da bancada de ensaio.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Algumas considerações da Norma Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), para garantir a mesma análise em coletores diferentes e em dias diferentes, não se fez necessário, visto que este estudo analisou os 5 coletores simultaneamente, ou seja, com as mesmas condições climáticas.

Nos primeiros ensaios de calibração, verificou-se que ao iniciar os testes em horário próximo as 9 horas, a água de entrada nos coletores esquentava até as 12 horas, período de maior radiação solar, com isso, para analisar os coletores com a menor temperatura de entrada da água possível, foram realizados ensaios no período das 11 às 18 horas.

Embora as medidas da umidade relativa do ar, velocidade do vento e direção do vento não foram utilizadas no cálculo da eficiência dos coletores solares, elas foram consideradas um parâmetro a mais para observar possíveis variações.

Para adicionar as barreiras no interior dos coletores foi necessário a retirada dos vidros. O vidro do coletor Trópicos foi fixado com silicone de alta temperatura. O silicone foi colocado no perfil lateral da caixa do coletor, que possui uma base para suportar o vidro. Desta maneira, o silicone aderiu muito bem ao perfil e ao vidro, impossibilitando a retirada do vidro sem que houvesse a quebra do mesmo. Portanto, a quebra do vidro foi necessária para a sua retirada, conforme Figura 65.

Figura 65: Retirada do vidro original do coletor.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

A fixação de vidros novos foi realizada com fita dupla face entre o vidro e o perfil do coletor, para que não fosse necessária a quebra do vidro na abertura do mesmo. A fita foi fixada totalmente no perfil, porém foram retirados pequenos pedaços da fita na parte superior, a qual entra em contato com o vidro, possibilitando a retirada do vidro para outras pesquisas. Após a colocação do vidro, foi aplicado silicone na parte lateral e superior, para aumentar a vedação e ajudar no suporte mecânico no vidro. Na Figura 66 pode ser vistas estas etapas da montagem do coletor.

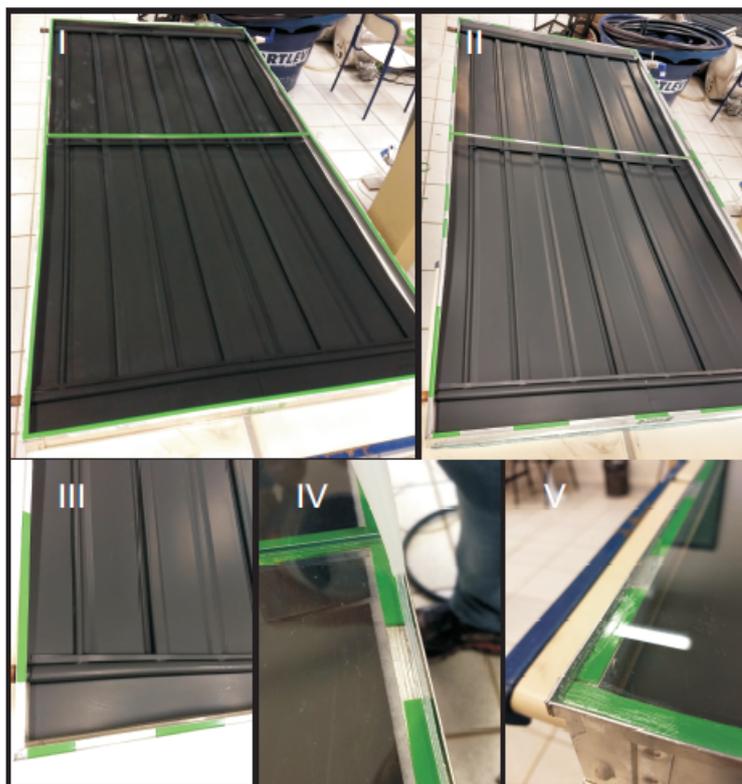
Antes de inserir as barreiras, os coletores foram fechados com os vidros novos, conforme descrito, e testados nos ensaios de eficiência. Isso foi necessário, haja visto que cada coletor, por mais padronizado que seja a produção, tem desvios pequenos de suas características, resultando em pequenas oscilações da eficiência. Este ensaio inicial possibilitou mensurar o desvio de cada conjunto da bancada, devido a diferença de eficiência térmica de cada coletor, o desvio de medidas dos sensores de temperatura (entrada e saída dos coletores) e o sensor de vazão. O método adotado para o cálculo desses desvios será decorrido no próximo subitem e os valores apresentados no capítulo de resultado.

As Figuras 67 e 68 mostram a bancada com os coletores nos ensaios iniciais.

Após o ensaio inicial, os coletores foram abertos novamente para inserir as barreiras, que são feitas com o mesmo vidro da superfície, ou seja, incolor e com 4 mm de espessura, sendo fixadas com silicone. A Figura 69 mostra as barreiras e a Figura 70 mostra a fixação das mesmas.

Apenas o coletor número um não foi alterado suas características originais, sendo considerado

Figura 66: Etapas de fixação do vidro do coletor.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

o coletor de referência. O coletor número dois foi adicionado uma barreira no meio da sua altura. O coletor número três foi adicionado duas barreiras, a 33% e 66% da sua altura. O coletor número quatro foi adicionado três barreiras, a 25%, 50% e 75% da sua altura. O coletor número cinco foi adicionado quatro barreiras, a 20%, 40%, 60% e 80% da sua altura. Após a fixação das barreiras, os coletores foram fechados com os vidros da mesma forma que foi realizada na primeira vez. A Figura 27 mostra o coletor de referência que está sem barreira e a Figura 71 mostra os coletores dois a cinco, destacando os locais onde as barreiras foram adicionadas.

Após a fixação de todas as barreiras e vidros, os coletores foram ensaiados da mesma forma e posicionamento que os ensaios iniciais. As Figuras 72 a 74 mostram a bancada com os coletores nos ensaios de teste com barreira.

Figura 67: Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio inicial (Vista da lateral esquerda).



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Figura 68: Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio inicial (Vista da lateral direita).



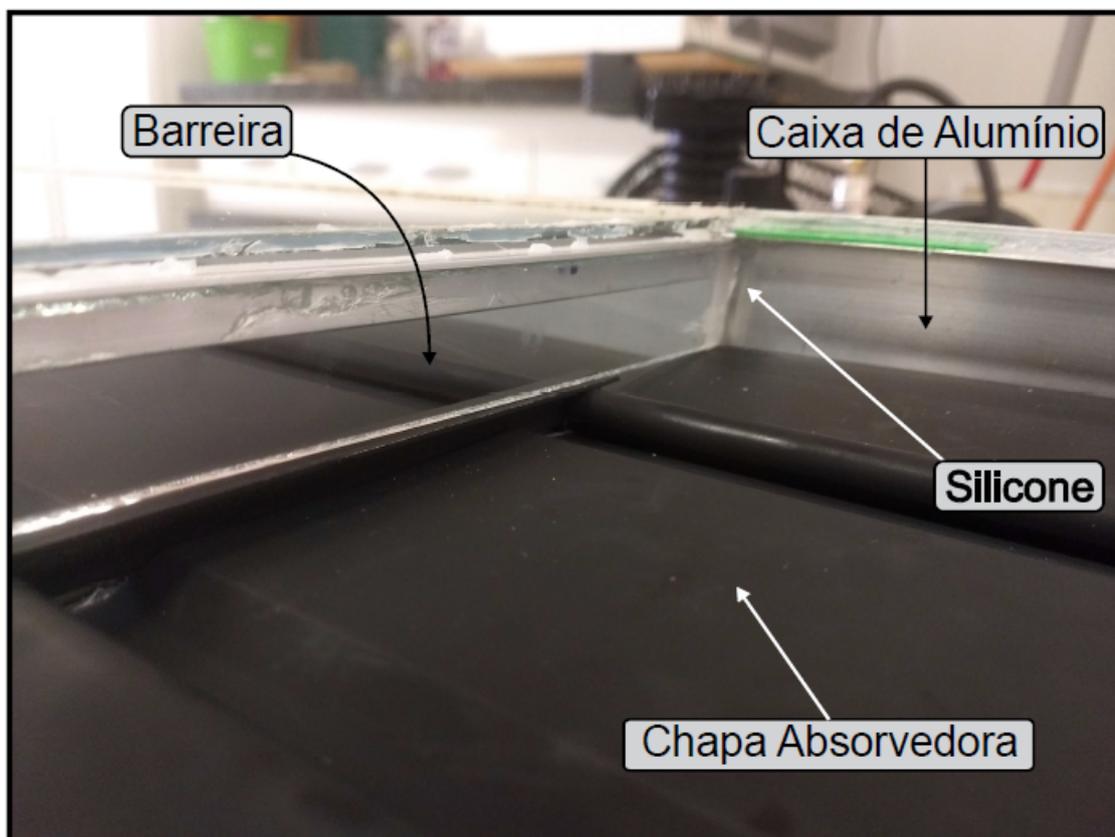
*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Figura 69: Barreiras de vidro.



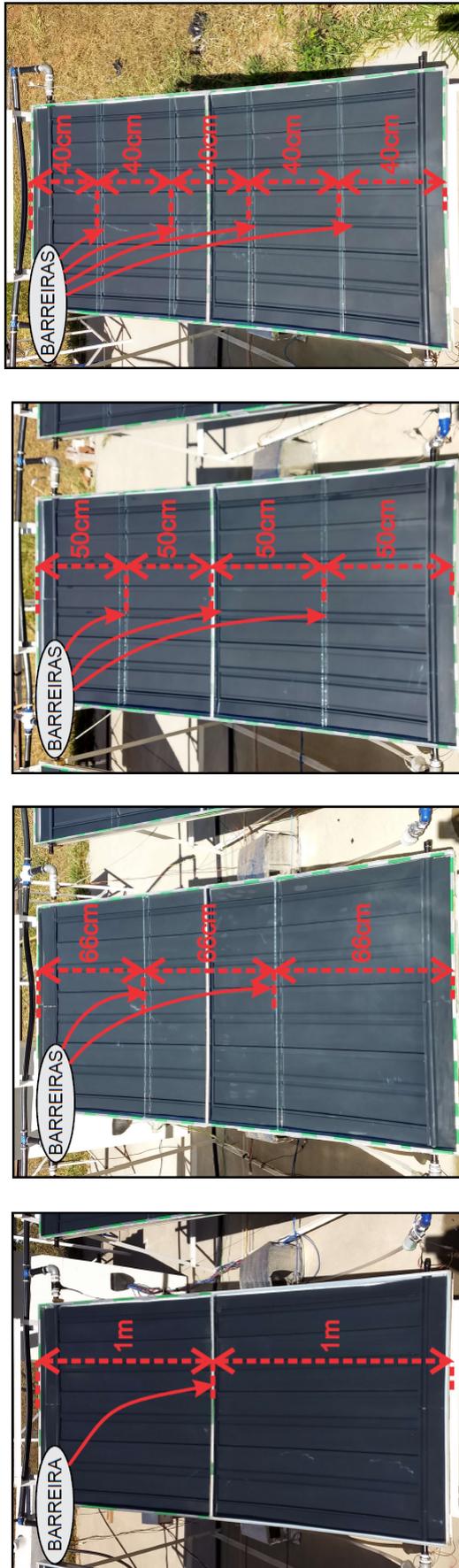
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 70: Fixação da barreira.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 71: Coletores com barreiras instalados na bancada de ensaio.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 72: Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio com barreiras (Vista Frontal).



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Figura 73: Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio com barreiras (Vista da lateral esquerda).



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Figura 74: Bancada de ensaio de eficiência de coletor solar térmico no ensaio com barreiras (Vista da lateral direita).



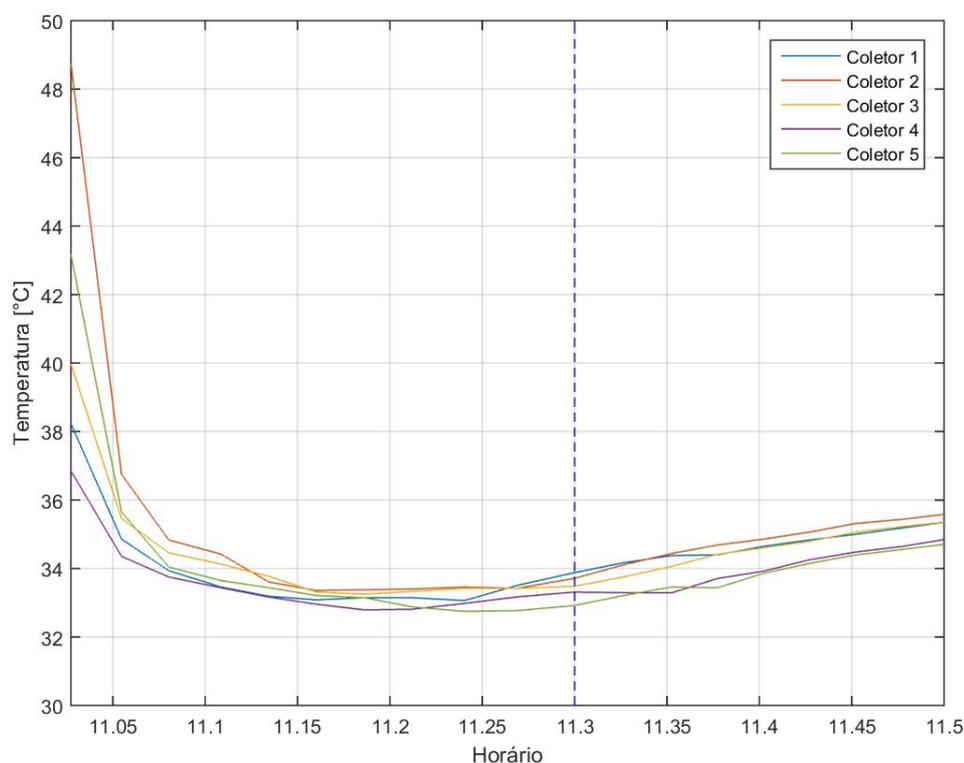
*Fonte: O próprio autor, 2019.*

## 3.4 Tratamento matemático

### 3.4.1 Filtros dos dados coletados

Em todos os ensaios, os dados iniciais foram descartados até que o coletor atingisse um regime uniforme. Essa verificação foi expressiva ao se verificar a temperatura na saída d'água dos coletores, as quais estavam elevadas antes de ligar a bomba d'água. A Figura 75 demonstra esse cenário.

Figura 75: Visualização da mudança de regime transiente para regime permanente da temperaturas de saída do coletor.



*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Todos os dados coletados foram transferidos para uma planilha eletrônica, que foi submetida a um algoritmo de tratamento dos dados, através do *software* Octave. Inicialmente, antes do cálculo dos resultados, foi efetuado um filtro dos valores para retirar os dados indesejados. Os dados foram coletados a cada ciclo (*loop*) da programação, sendo que a duração do ciclo é de aproximadamente 50 segundos, ou seja, a cada 50 segundos todos os dados (temperaturas, vazão, radiação, etc) eram coletados. O controlador além de atuar nos controles das vazões, coletou todas as informações dos sensores e registrou junto com a informação do dia e hora no cartão de memória. Um filtro da programação descartou todos os termos de um ciclo coletado, caso tivesse algum termo fora do

intervalo desejado. O filtro foi empregado no termo da vazão (dos 5 coletores), da radiação solar e na diferença de temperatura de saída menos a temperatura de entrada d'água. A vazão, embora tenha sido controlada para operar na faixa de 2,2 à 2,4 l/min por coletor, obteve poucos pontos fora da faixa determinada. A radiação foi estabelecida acima de 100 W/m<sup>2</sup> para padronizar o nível mínimo de radiação ao invés de um intervalo do horário ensaiado, garantindo uma padronização em diferentes dias. No final dos ensaios, a temperatura de entrada da água dos coletores atingia um valor superior a temperatura de saída, quando a radiação era baixa e a água de entrada alta, portanto foi realizado um filtro de descarte dos pontos quando a diferença foi inferior a zero.

### 3.4.2 Cálculo da eficiência de coletor solar

Após o filtro e descarte dos dados indesejáveis, foi calculado a eficiência de cada coletor em cada ciclo de coleta. Conforme Kalogirou (2016), calcula-se a eficiência de coletor solar de placa plana através da equação

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)}{G \cdot A_{col}} \quad (3.2)$$

onde  $\eta$ : eficiência,

$\dot{Q}$ : energia térmica absorvida pelo coletor,

$S$ : irradiação solar global incidente no coletor,

$\dot{m}$ : vazão mássica do fluido,

$c_p$ : calor específico da água,

$T_s$ : temperatura da água na saída do coletor,

$T_e$ : temperatura da água na entrada do coletor,

$G$ : irradiação solar global no plano do coletor,

$A_{col}$ : área transparente do coletor.

Com os dados coletados durante os ensaios foi possível calcular a eficiência instantânea, já que os testes foram ensaiados em regime permanente, ou seja, com mínimas variações das temperaturas e vazão num intervalo pequeno de tempo, sendo constante a área de abertura do coletor e o calor específico da água. Desta forma, pode-se verificar o comportamento térmico de cada coletor com o cálculo da eficiência instantânea. Foi utilizado o método estatístico de Chauvenet, como detalhado por Taylor (1997), para refinar os dados coletados. A aplicação desse método propõe que sejam descartadas as medidas com desvios significativos. O valor e a condição de descarte depende basicamente do tamanho da amostra “n” utilizada e está associada ao nível de confiança de 99%. Para aplicação deste método, como em qualquer distribuição normal, é necessário o cálculo da média e do desvio padrão. Em seguida, calcula-se o desvio máximo aceitável. Feito isto, pode-se eliminar todos os pontos que estão fora do intervalo definido entre a média menos o desvio máximo aceitável até a média mais o desvio máximo aceitável. (TAYLOR, 1997)

Depois de aplicado o método de Chauvenet e descartados os pontos, calculou-se uma nova média e um novo desvio padrão que passou a ser os valores representativos dos experimentos e utilizados nos demais cálculos. Um novo número de amostras “n” é utilizado.

Conforme a norma [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2009\)](#), a análise da eficiência de coletores solares é analisada com o gráfico da eficiência versus o parâmetro de perda de calor (*PPC*), definido na equação

$$PPC = \frac{T_m - T_a}{G} \quad (3.3)$$

onde  $T_a$ : temperatura ambiente,

$T_m$ : temperatura média.

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (3.4)$$

Desta forma, foi levantado o comportamento da curva da eficiência de cada coletor versus o parâmetro *PPC*.

### 3.4.3 Correção dos desvios entres os coletores

Conforme já mencionado, inicialmente foi realizado um ensaio sem modificação nos coletores para analisar o comportamento térmico de cada bancada, ou seja, analisar o desvio do conjunto de todos sensores somado ao comportamento térmico de cada coletor. Desta forma, foi calculada a curva da eficiência versus *PPC* para cada coletor. Assim, foi possível comparar o coletor referência com os outros coletores e calcular os coeficientes de ajuste. Tais coeficientes são calculados para que a curva do coletor em questão tenha a mesma inclinação e posição do coletor de referência. Os dois primeiros coeficientes de ajuste foram necessários para que a curva obtida seja convertida numa curva ajustada com a mesma inclinação da curva do coletor de referência. Nesta primeira etapa foi calculado o novo valor do eixo da abcissa, através da equação

$$x' = x \cdot c_{a1} + c_{a2} \quad (3.5)$$

onde  $x'$ : valor ajustado da abcissa (*PPC*),

$x$ : valor obtido da abcissa (*PPC*),

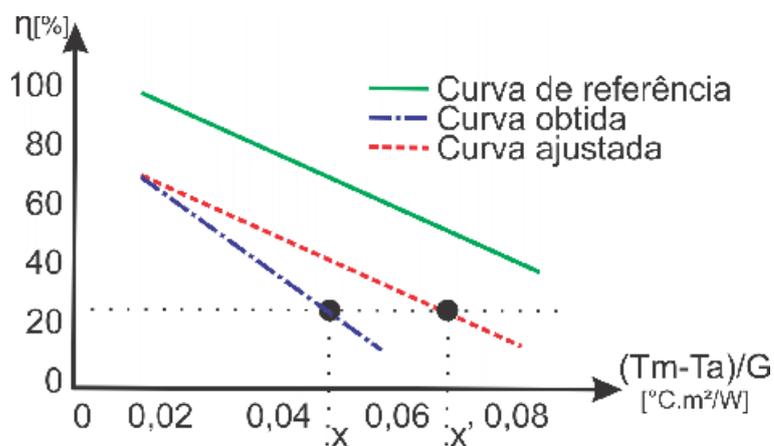
$c_{a1}$ : coeficiente de ajuste 1,

$c_{a2}$ : coeficiente de ajuste 2.

A Figura 76 mostra uma ilustração desta etapa do cálculo destes dois coeficientes de ajuste.

O terceiro coeficiente de ajuste foi necessário para que a curva obtida seja convertida numa curva ajustada com a mesma posição da curva do coletor de referência. Nesta etapa foi calculado o novo valor do eixo da ordenada, através da equação

Figura 76: Ilustração do ajuste da inclinação da curva do coletor solar.



Fonte: O próprio autor, 2019.

$$y' = y + c_{a3} \quad (3.6)$$

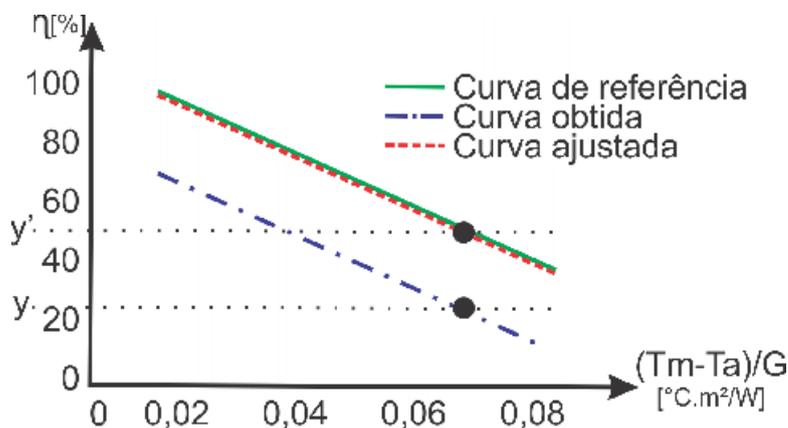
onde  $y'$ : valor ajustado da ordenada ( $\eta$ ),

$y$ : valor obtido da ordenada ( $\eta$ ),

$c_{a3}$ : coeficiente de ajuste 3.

A Figura 77 mostra uma ilustração desta etapa do cálculo deste coeficiente de ajuste.

Figura 77: Ilustração do ajuste da posição da curva do coletor solar.



Fonte: O próprio autor, 2019.

### 3.4.4 Incerteza da instrumentação

A análise anteriormente apresentada foi realizada com base numa instrumentação que tem incertezas associadas a cada medida realizada. Quando estes valores eram usados no cálculo de outras grandezas a propagação dessa incerteza era avaliada pelo critério de incerteza provável usando o valor RMS (do inglês *root mean square* ou valor eficaz) dos valores obtidos. Assim,

numa função no formato  $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , segundo Taylor (1997), a incerteza é definida pela equação:

$$W_f = \left[ \left( \frac{F}{X_1} \cdot W_1 \right)^2 + \left( \frac{F}{X_2} \cdot W_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{F}{X_n} \cdot W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

sendo  $W_f$  a incerteza resultante,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  as variáveis da função e  $W_1, W_2, \dots, W_n$  as incertezas correspondentes das variáveis.

Aplicando a equação 3.7 na equação 3.2, temos a equação

$$W_\eta = \left[ \left( \frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}} \cdot W_{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial c_p} \cdot W_{c_p} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial T_s} \cdot W_{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial T_e} \cdot W_{T_e} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial G} \cdot W_G \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial A_{col}} \cdot W_{A_{col}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

onde o cálculo das derivadas são:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}} = \left[ \frac{c_p (T_s - T_e)}{A_{col} G} \right] \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial c_p} = \left[ \frac{\dot{m} (T_s - T_e)}{A_{col} G} \right] \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_s} = \left[ \frac{\dot{m} c_p}{A_{col} G} \right] \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_e} = \left[ -\frac{\dot{m} c_p}{A_{col} G} \right] \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial A_{col}} = \left[ -\frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{A_{col}^2 G} \right] \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial G} = \left[ -\frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{A_{col} G^2} \right] \quad (3.14)$$

Incluindo as derivadas na expressão 3.8 obtém-se

$$W_\eta = \left[ \left( W_{\dot{m}} \cdot \frac{c_p (T_s - T_e)}{A_{col} G} \right)^2 + \left( W_{c_p} \cdot \frac{\dot{m} (T_s - T_e)}{A_{col} G} \right)^2 + \left( W_{T_s} \cdot \frac{\dot{m} c_p}{A_{col} G} \right)^2 + \left( W_{T_e} \cdot -\frac{\dot{m} c_p}{A_{col} G} \right)^2 + \left( W_G \cdot -\frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{A_{col} G^2} \right)^2 + \left( W_{A_{col}} \cdot -\frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{A_{col}^2 G} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

A incerteza de cada variável está relacionada a precisão de cada sensor, equipamento de medida usado na calibração e incertezas das constantes das curvas de calibração. A vazão, por exemplo, é obtida da equação de calibração apresentada no Apêndice B. Esta equação é uma relação entre os

pulsos medidos pelo sensor de vazão e a vazão volumétrica da água, onde a equação 3.16 mostra o seu formato.

$$\dot{m} = N_{pulso} \cdot CV_1 + CV_2 \quad (3.16)$$

onde  $N_{pulso}$ : número de pulsos medidos pelo sensor de vazão,

$CV_1$ : constante angular da curva de calibração do sensor de vazão,

$CV_2$ : constante linear da curva de calibração do sensor de vazão.

Desta maneira, para calcularmos a incerteza na medida da vazão ( $W_{\dot{m}}$ ), temos que aplicar a equação 3.7 na equação 3.16, obtendo a equação

$$W_{\dot{m}} = \left[ \left( \frac{\dot{m}}{\partial N_{pulso}} \cdot W_{N_{pulso}} \right)^2 + \left( \frac{\dot{m}}{\partial CV_1} \cdot W_{CV_1} \right)^2 + \left( \frac{\dot{m}}{\partial CV_2} \cdot W_{CV_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

Calculando as derivadas da equação 3.17, temos a equação

$$W_{\dot{m}} = \left[ (CV_1 \cdot W_{N_{pulso}})^2 + (N_{pulso} \cdot W_{CV_1})^2 + (W_{CV_2})^2 \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

A incerteza relacionada ao número de pulso ( $W_{N_{pulso}}$ ) está na ordem de milionésimos, pois o controlador usado possui uma velocidade alta de processamento, podendo ser desprezada. A incerteza relacionada aos coeficientes das curvas de calibração são calculadas pela função "PROJ.LIN" no software "Excel", a qual os valores estão no Apêndice B.

Para avaliação das temperaturas seria usual utilizar o valor de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  informado no *datasheet* do fabricante, como pode ser visto no Anexo III. Para minimizar um pouco mais este valor, os sensores de temperatura foram submetidos a um processo de calibração como descrito no Apêndice D. Com este procedimento a incerteza do sensor de temperatura foi considerada como igual à média dos erros padrão num intervalo de confiança de 95%, definido por Holman (2001) com a equação:

$$EP = t_{95\%} \cdot \frac{\sigma}{[N]^{1/2}} \quad (3.19)$$

onde  $EP$ : erro padrão,

$t_{95\%}$ : valor do t de student para 95% de confiança,

$\sigma$ : desvio padrão,

$N$ : tamanho da amostra.

e resultando no valor  $W_{T_s} = W_{T_e} = \pm 0,1322^\circ\text{C}$ .

A incerteza em relação a medida do sensor de radiação, conforme descrito anteriormente, está relacionado a diferença de temperatura de dois sensores, entre a temperatura quente (placa de absorção da radiação solar) e a temperatura ambiente. A equação 3.20 representa a curva de calibração.

$$G = (T_q - T_a) \cdot CR \quad (3.20)$$

Aplicando a equação 3.7 na equação 3.20, temos a equação

$$W_G = \left[ \left( \frac{\partial G}{\partial T_q} \cdot W_{T_q} \right)^2 + \left( \frac{\partial G}{\partial T_a} \cdot W_{T_a} \right)^2 + \left( \frac{\partial G}{\partial CR} \cdot W_{CR} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

Calculando as derivadas da equação 3.21, temos a equação

$$W_G = \left[ (CR \cdot W_{T_q})^2 + (-CR \cdot W_{T_a})^2 + ((T_q - T_a) \cdot W_{CR})^2 \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

sendo a incerteza da medida da temperatura quente e ambiente, temos que  $W_{T_q} = W_{T_a} = \pm 0,1322^\circ\text{C}$ , pois foi usado o mesmo sensor para a medida das temperaturas de entrada e saída da água dos coletores, conforme já descrito. A incerteza do coeficiente angular  $CR = 37,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  da curva de calibração é calculado pela função "PROJ.LIN" no *software* "Excel", sendo o valor igual a  $W_{CR} = \pm 0,882 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Para o cálculo da incerteza em relação a área do coletor, aplicamos a equação 3.7 na expressão de cálculo da área de um retângulo, onde a área é igual ao comprimento vezes a largura, temos a equação

$$W_{A_{col}} = \left[ \left( \frac{\partial A_{col}}{\partial Comprimento} \cdot W_{Comprimento} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_{col}}{\partial Largura} \cdot W_{Largura} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

Calculando as derivadas da equação 3.23, temos a equação

$$W_{A_{col}} = \left[ (Largura \cdot W_{Comprimento})^2 + (Comprimento \cdot W_{Largura})^2 \right]^{1/2} \quad (3.24)$$

A área do coletor foi medida com uma trena, com comprimento médio de 1,92 m e largura de 1,00 m. A trena possui uma incerteza da medida é igual a 0,0005 m, metade do menor intervalo. Com isso, obtemos um valor da incerteza da área igual a  $W_{A_{col}} = \pm 0,01082 \text{ m}^2$ . Assim, todas as variáveis da equação 3.8 foram estimadas e é possível calcular a incerteza média, máxima e mínima da eficiência térmica para todos os dados coletados.

Seria possível ainda uma análise relativa, levando em conta as condições do teste. Todos os ensaios foram realizados de forma simultânea e, por conta disso, a incerteza em relação a radiação solar ( $W_G$ ) e a incerteza em relação a área ( $W_{A_{col}}$ ) poderiam ser desprezadas já que afetem todos os testes de forma igualitária. Desta forma, simplificando a equação 3.8, temos a equação

$$W_{\eta_c} = \left[ \left( \frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}} \cdot W_{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial T_s} \cdot W_{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial T_e} \cdot W_{T_e} \right)^2 + \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

onde  $W_{\eta_c}$ : incerteza da eficiência térmica comparativa dos coletores.

# Capítulo 4

## Resultados

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados na bancada de teste dos coletores solares. Conforme explicado, inicialmente foi realizado um teste com todos os coletores sem modificação, ou seja, sem adicionar barreiras no interior de suas cavidades. Portanto, primeiramente será apresentado os resultados dos ensaios sem barreira e posteriormente os resultados com barreira.

Os resultados do coletor dois não será apresentado devido a desvio e erros dos dados coletados, causados por uma falha no sensor de monitoração da temperatura de saída d'água.

Os ensaios sem e com barreira foram realizados em vários dias para melhor demonstrar os resultados. Nos gráficos foram fixados o valor do eixo da abcissa entre o período das 10 as 18 horas, a partir de uma "nuvem de pontos", na qual pode-se verificar o comportamento de todos os dias juntos, com o intuito de obter uma média de vários dias.

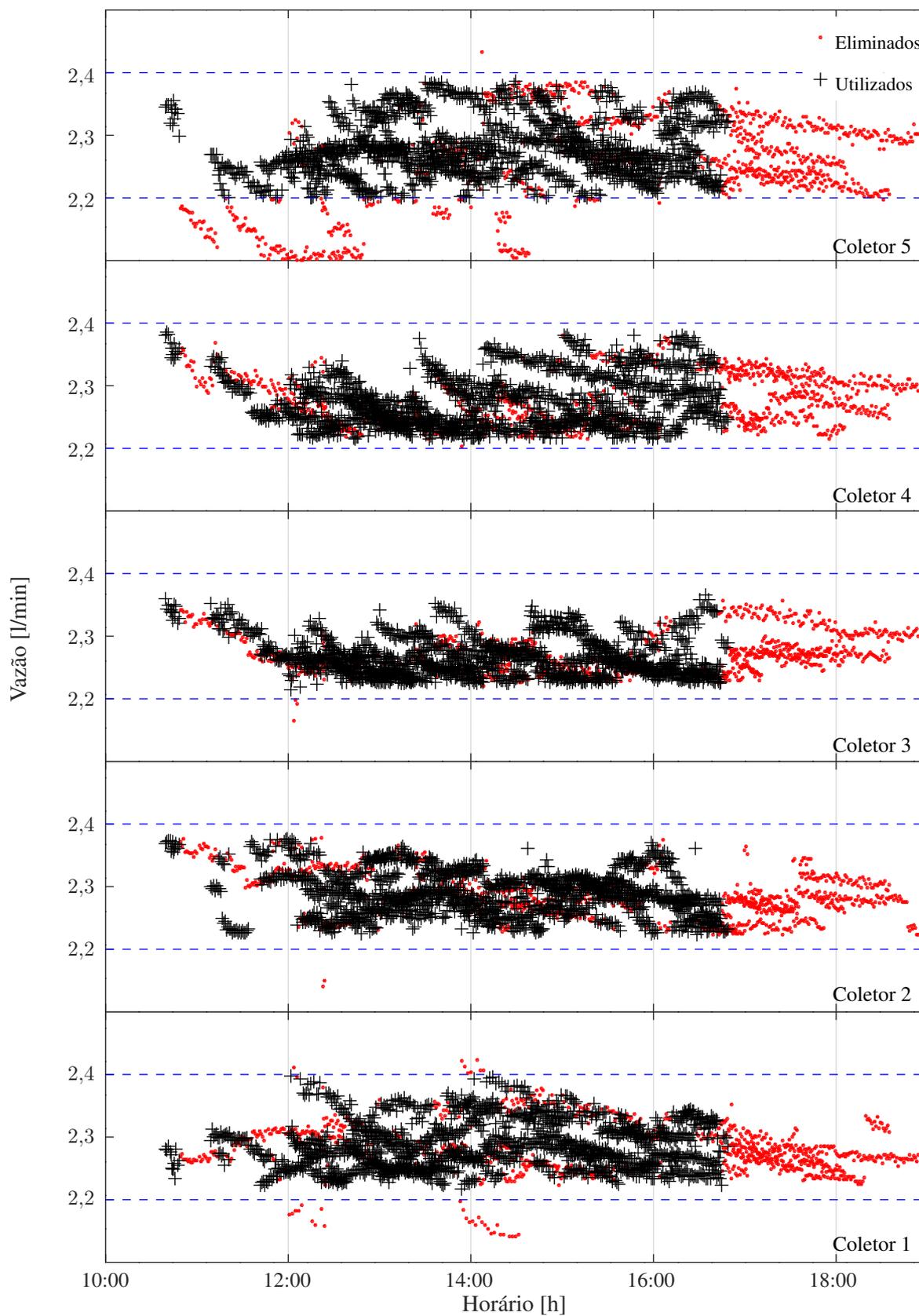
### 4.1 Resultados dos Ensaios Sem Barreira

O período da coleta do ensaio sem barreira foi durante o mês de junho de 2018, porém, os dias em que não houveram uma boa radiação solar, como a presença de chuva ou algum outro motivo que interferisse na coleta, os dados não foram coletados ou foram descartados. Desta forma, os dados foram coletados apenas nos dias 14, 16, 18 a 22 e 25 de junho de 2018.

As vazões dos 5 coletores ficaram dentro da faixa determinada e controlada pelo controle de vazão, entre 2,2 a 2,4 l/min, onde houveram poucos pontos fora desta faixa, mostrando-se eficiente o controle de vazão, a qual permaneceu dentro de valores esperados e esteve de acordo com a norma [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2009\)](#). As vazões são mostradas na Figura 78.

A temperatura de entrada da água nos coletores aumentaram ao longo dos dias durante os ensaios. Isso deve-se ao fato da água aquecida nos coletores retornar ao sistema da bancada. Embora tenham sido utilizadas duas caixas de 500 litros, as mesmas não possuíam isolamento térmico.

Figura 78: Vazões d'água dos coletores nos ensaios sem barreira.



Fonte: O próprio autor, 2019.

As conexões entre as caixas também favoreciam a menor temperatura de retorno, uma vez que a absorção de calor dos cinco coletores solares é maior que a perda de calor destes para o ambiente. Desta forma, a água aumentou de temperatura durante os ensaios. A variação da temperatura de entrada foi interessante para obter uma maior faixa do parâmetro de perda de calor (PPC), conforme equação 3.3, e para obtermos pontos mais distintos da curva de eficiência versus o PPC. A Figura 79 mostra os valores das temperaturas de entrada da água dos 5 coletores, onde pode-se notar que a temperatura máxima estava em torno de 53°C, por volta das 15h30min. Já as temperaturas de saída da água são mostradas na Figura 80, cujas as temperaturas aumentaram ao longo do ensaios por estarem atreladas as temperaturas de entrada, conforme explicado. A temperatura de saída máxima estiveram em torno de 55°C, também por volta das 15h30min.

A diferença entre a temperatura de saída e a temperatura de entrada dos 5 coletores são mostradas na Figura 81. Foi observado que num determinado período do ensaio, o coletor não conseguiu mais absorver energia térmica. Tal fato está vinculado a diminuição da radiação solar somado ao aumento de temperatura da água de entrada. Com isso, após um determinado período, o coletor passa a ser um dissipador de energia térmica para o ambiente, pois altas temperaturas da água aumentam a perda de calor a qual a radiação solar não consegue suprir. A partir deste ponto a diferença destas temperaturas (saída menos entrada) foi negativa e por isso foram descartadas, conforme explicado nos filtros dos dados no capítulo anterior. Também pôde-se observar que os coletores apresentaram máximos incrementos na faixa de 9°C de temperatura, por volta da 12h30min.

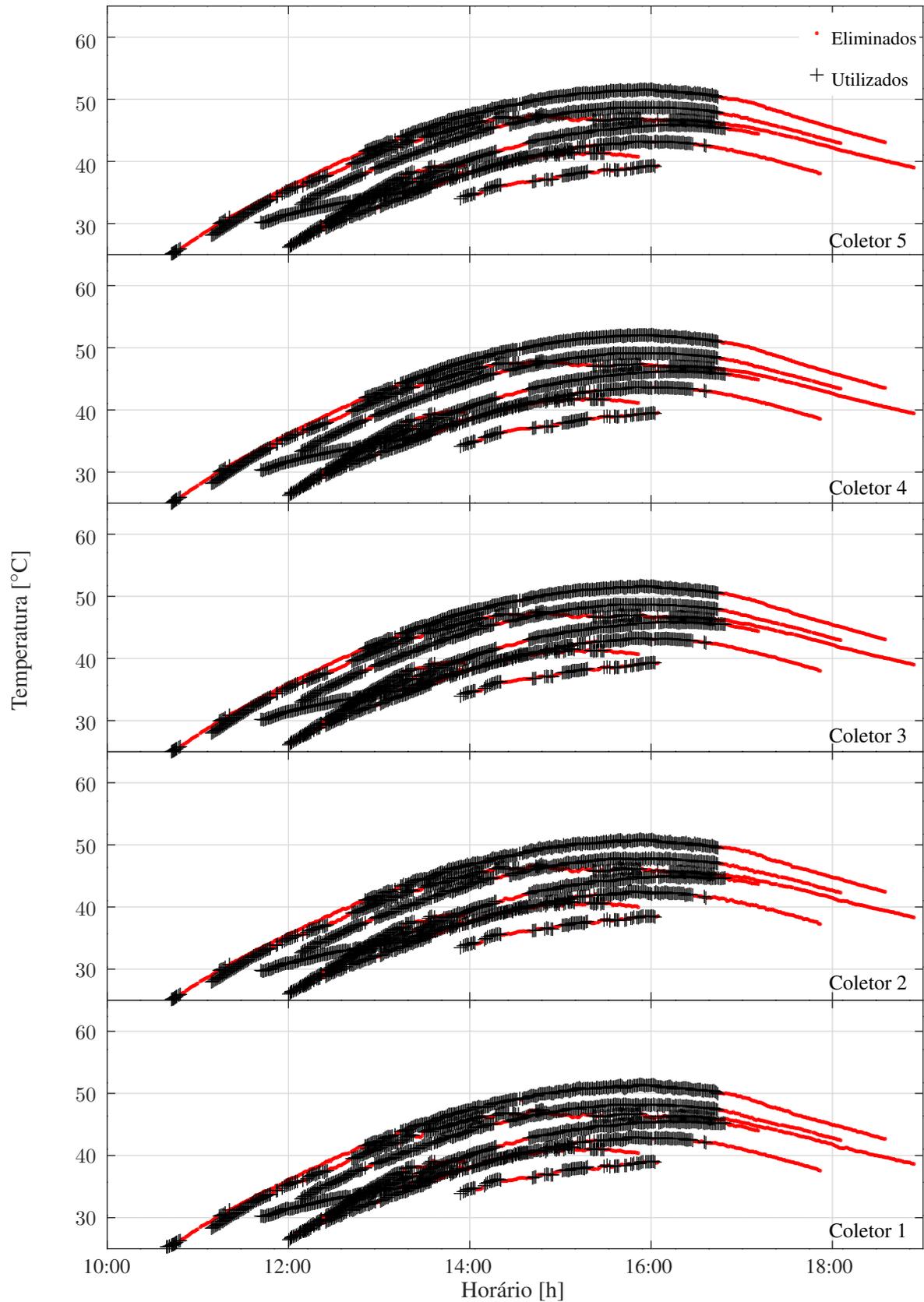
O comportamento do nível da radiação solar teve pouca oscilação brusca, ou seja, durante os ensaios houveram poucas nuvens no céu, as quais provocam sombreamento nos coletores. A Figura 82 mostra o comportamento da radiação solar, onde obteve um valor máximo próximo de 900 W/m<sup>2</sup>, por volta das 13 horas.

Embora não tenham sido utilizados para o cálculo da eficiência, os valores da temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento são considerados parâmetros que influenciam diretamente na perda de calor do coletor para o meio ambiente. As Figuras 83 a 85 mostram estas grandezas ao longo dos ensaios, respectivamente. A temperatura ambiente ficou em torno de 20°C a 30°C e a umidade relativa do ar ficou em torno de 30% a 50%. A velocidade do vento, em sua maioria, esteve com níveis a baixo de 10,8 km/h.

Com os dados coletados dos sensores, calculou-se a energia térmica absorvida de cada coletor, através da equação 3.1, conforme mostrado na Figura 86, onde pode-se observar que a máxima energia absorvida coincide com a máxima radiação solar.

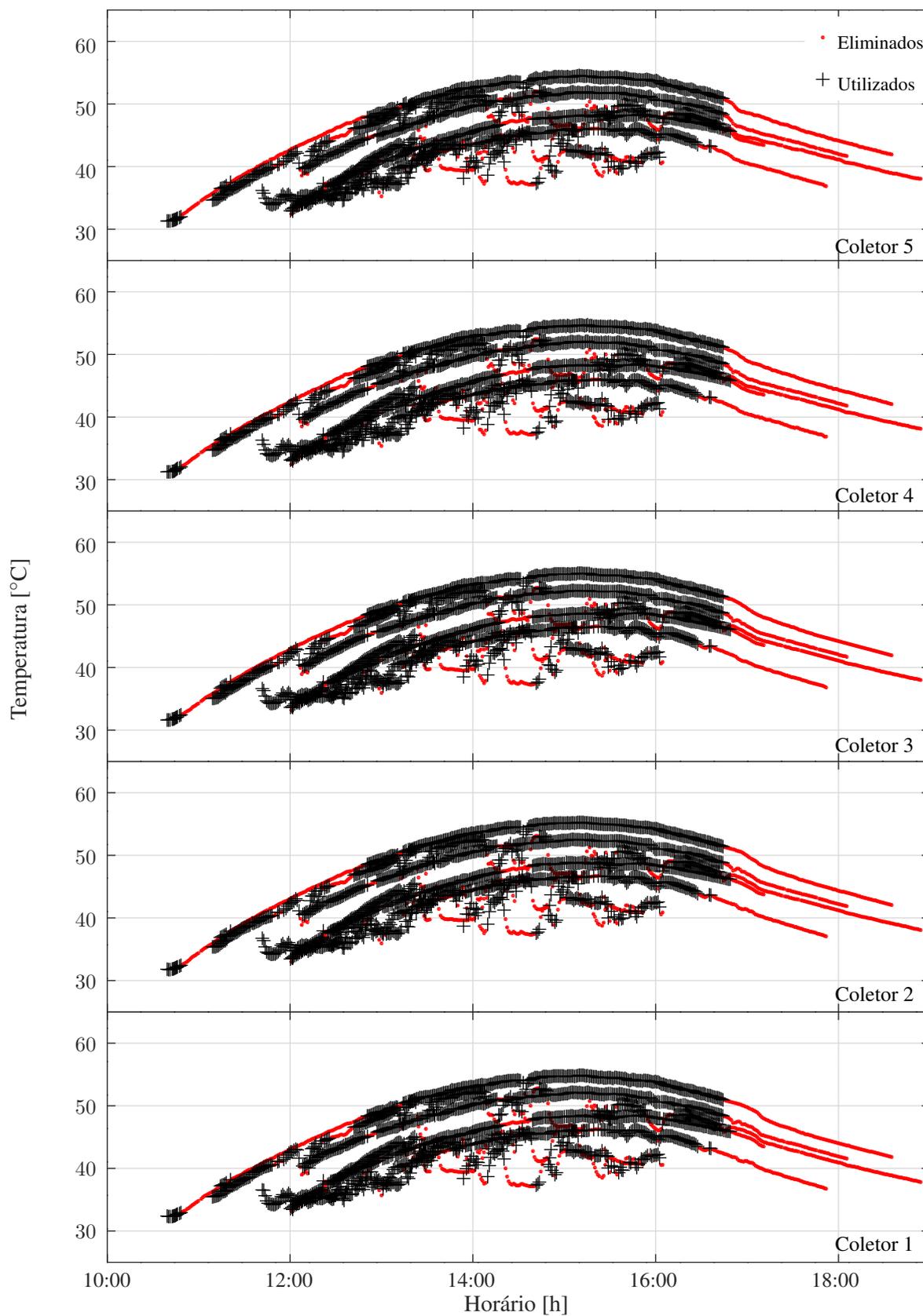
Com a radiação incidente multiplicado pela área transparente de cada coletor, calculou-se a eficiência térmica, através da equação 3.1, conforme mostra a Figura 87. Observam-se que os valores foram na faixa de 60% a 80% nas primeiras horas dos ensaios. As eficiências ficam menores a medida que aumenta a temperatura de entrada e, conseqüentemente, a perda de calor.

Figura 79: Temperatura da água na entrada dos coletores nos ensaios sem barreira.



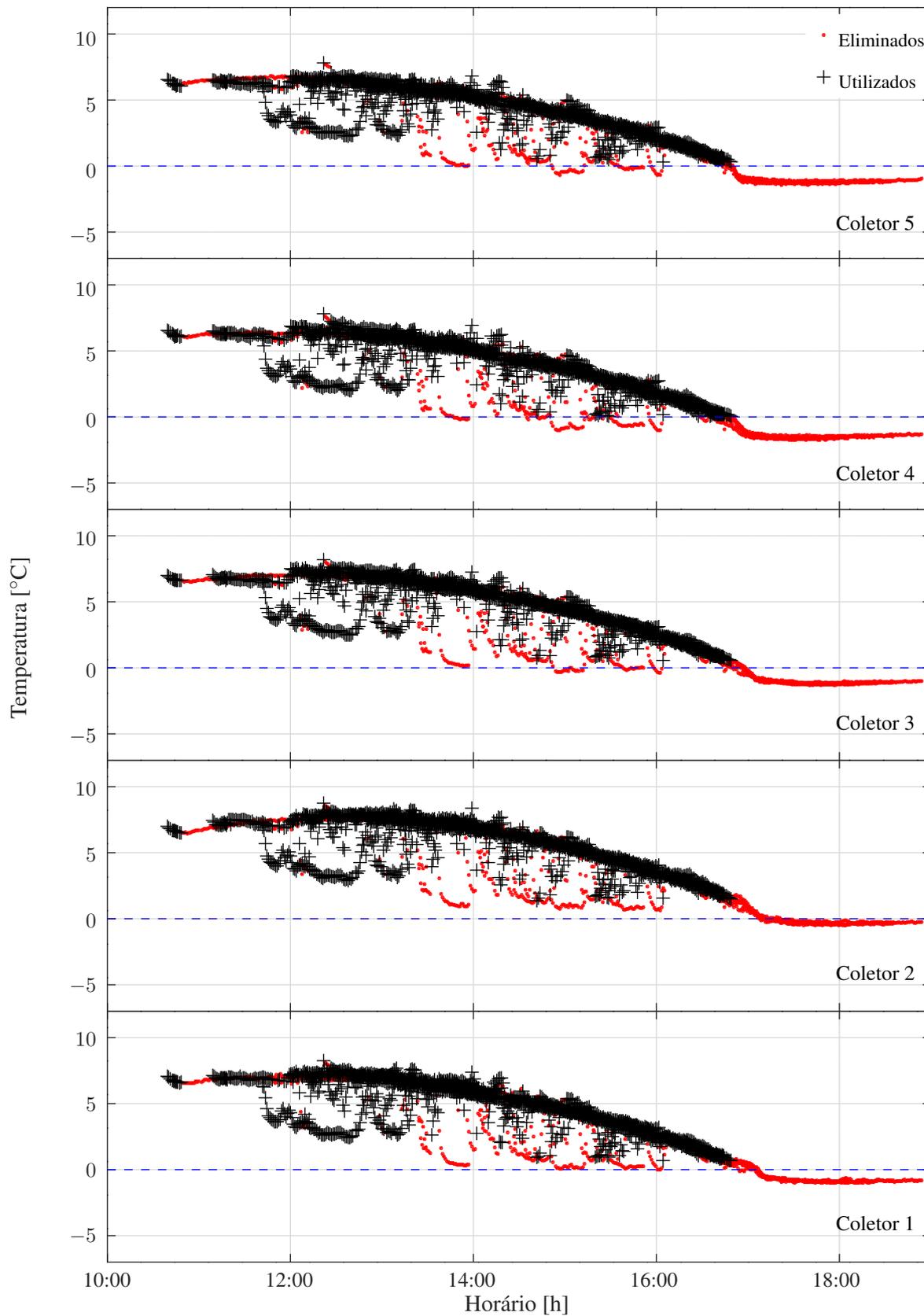
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 80: Temperatura da água na saída dos coletores nos ensaios sem barreira.



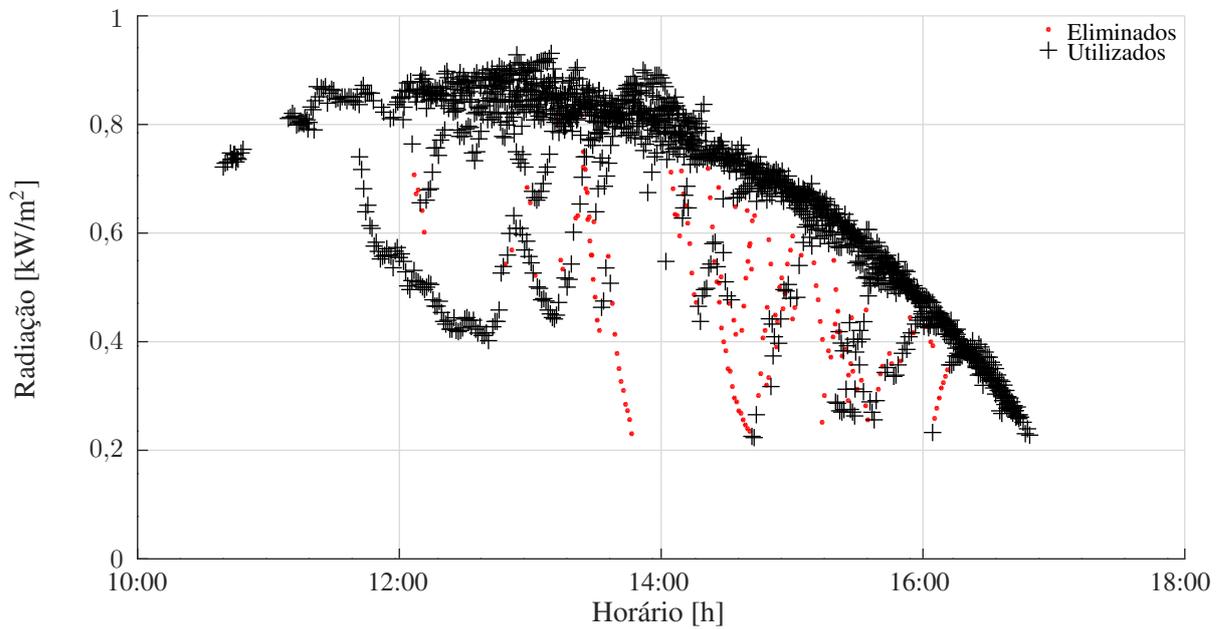
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 81: Diferença das temperaturas da água entre a entrada e saída dos coletores nos ensaios sem barreira.



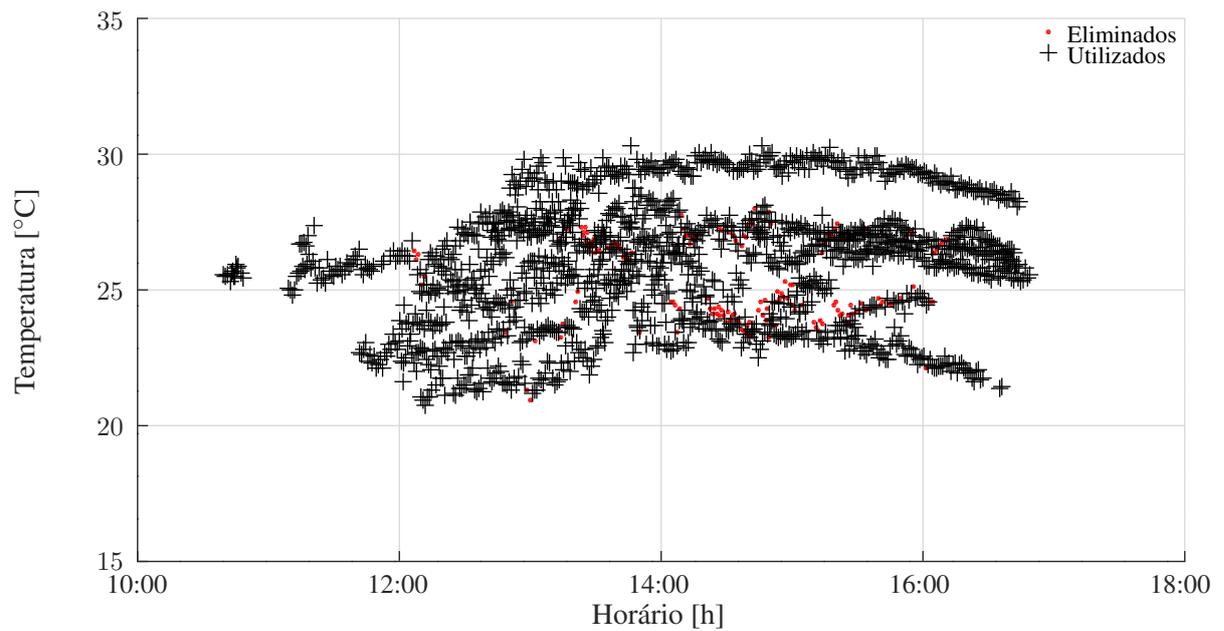
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 82: Radiação nos ensaios sem barreira.



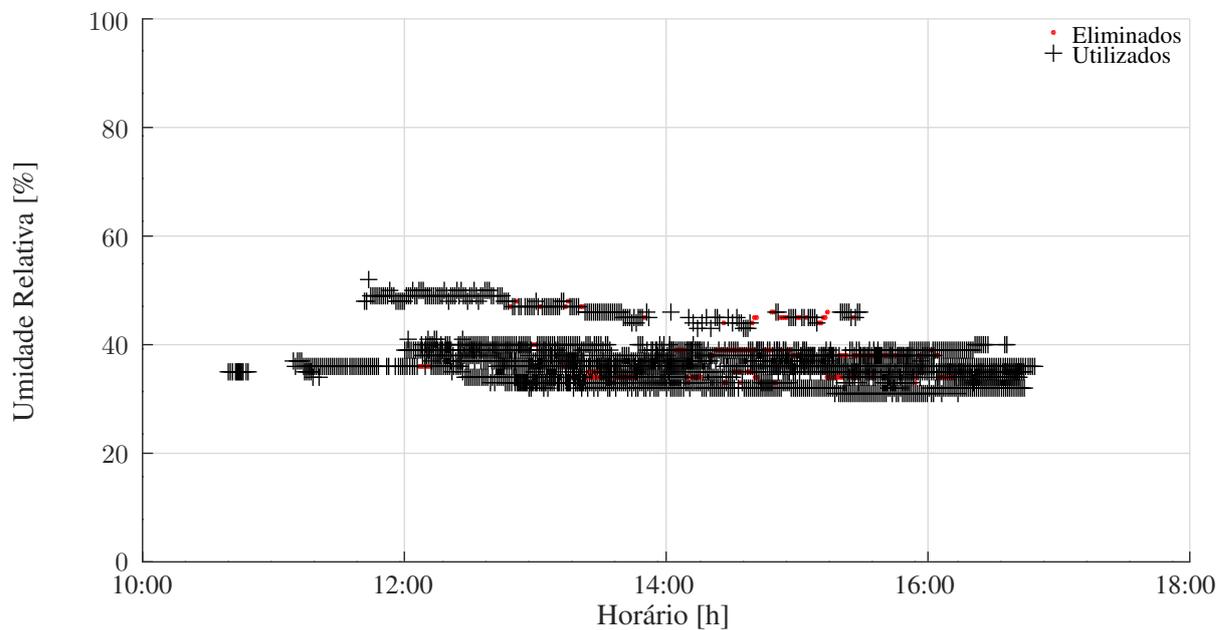
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 83: Temperatura ambiente nos ensaios sem barreira.



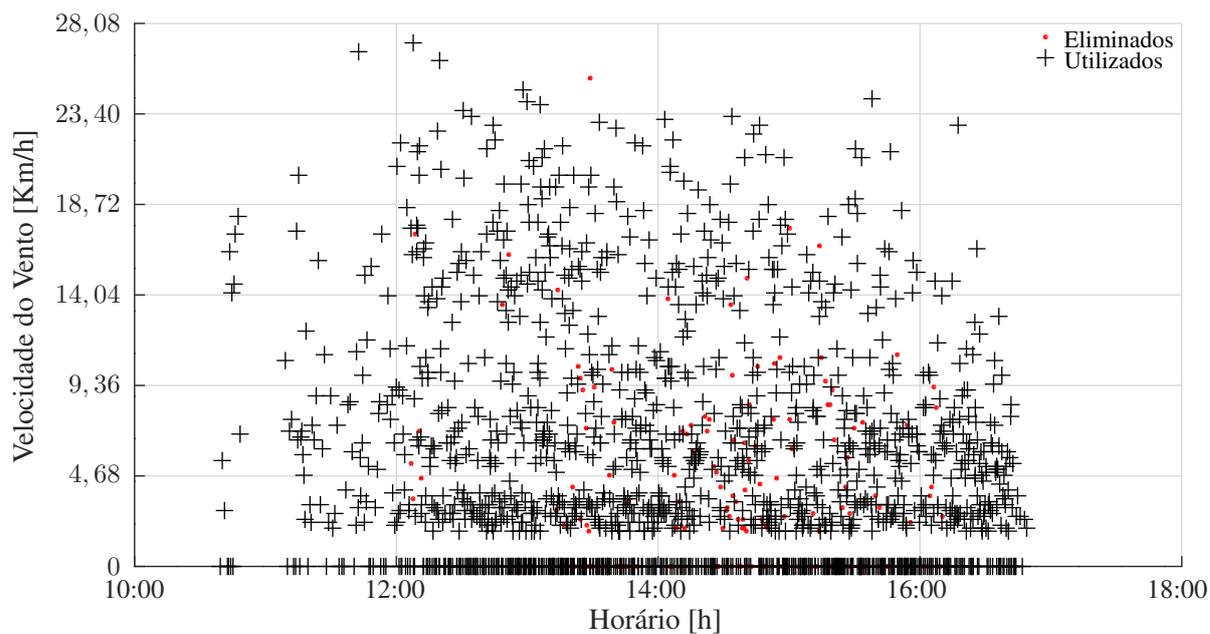
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 84: Umidade relativa do ar nos ensaios sem barreira.



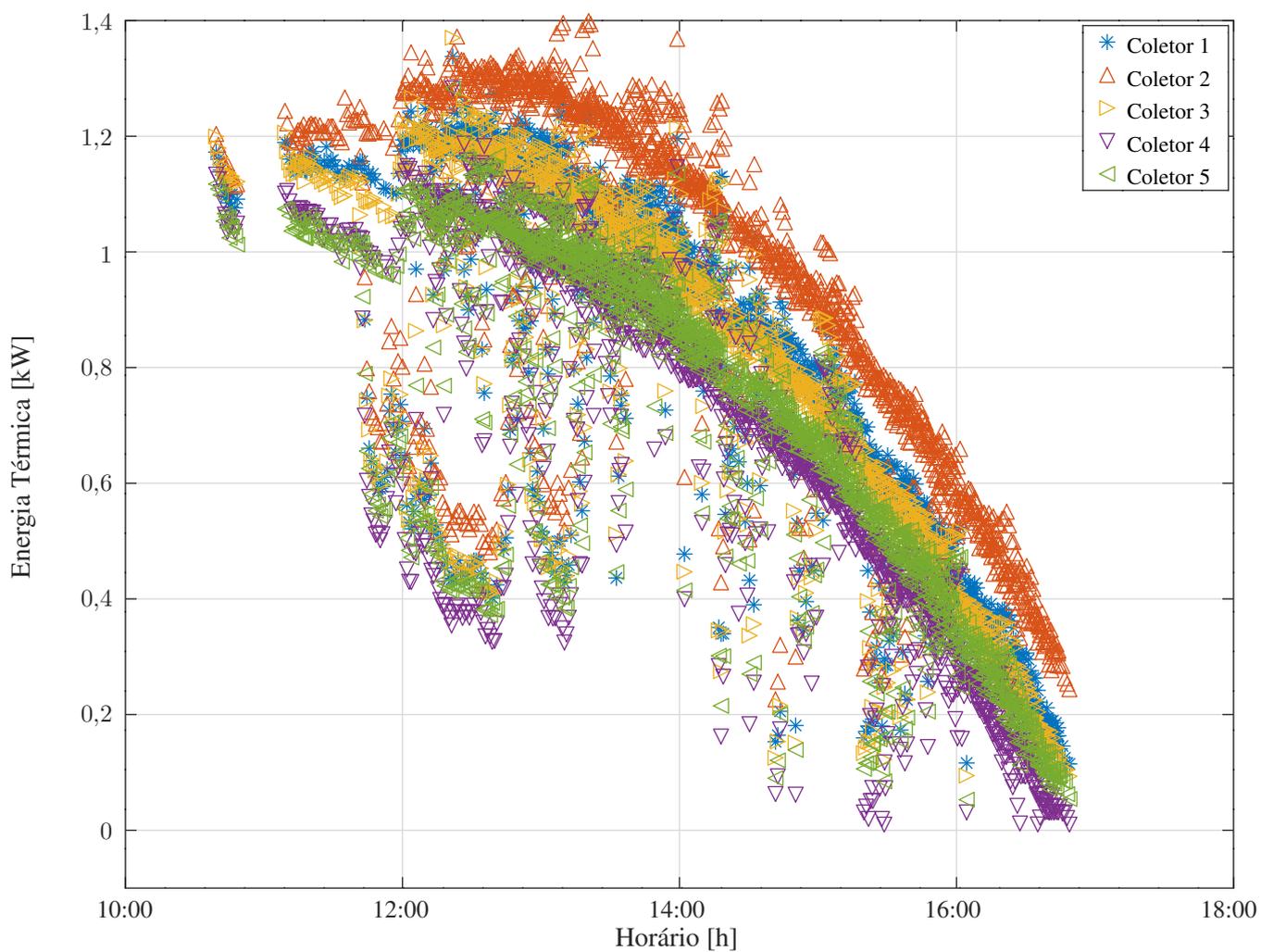
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 85: Velocidade do vento nos ensaios sem barreira.



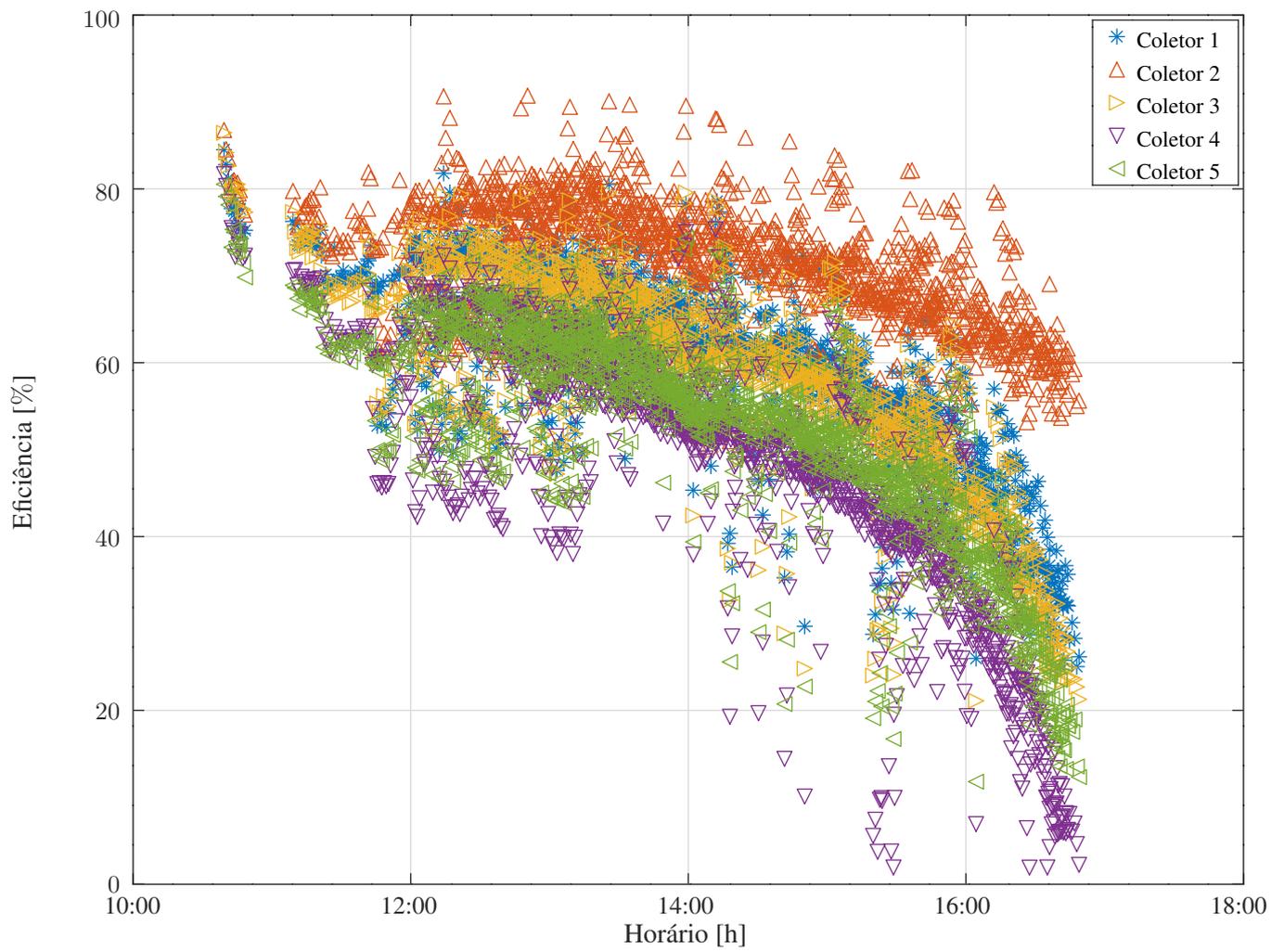
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 86: Energia térmica absorvida dos coletores nos ensaios sem barreira.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 87: Eficiência dos coletores nos ensaios sem barreira.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Os valores da eficiência são próximos aos valores obtidos pelo ensaio de certificação do coletor (Anexo II), validando o resultado experimental. A Tabela 4 mostra os valores da incerteza da eficiência dos coletores com o uso da instrumentação escolhida e da mesma forma a Tabela 5 mostra os valores da incerteza da eficiência comparativa entre os coletores. Conforme já explicado, a incerteza da eficiência comparativa da eficiência não leva em consideração o erro na medição da radiação solar e da área do coletor.

Tabela 4: Incerteza da eficiência térmica dos coletores ( $W_\eta$ ).

Coletor	01	02	03	04	05
Média do $W_\eta$	3,042%	3,066%	3,033%	3,033%	3,034%
Desvio Padrão do $W_\eta$	0,716%	0,724%	0,713%	0,723%	0,733%

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Tabela 5: Incerteza da eficiência térmica comparativa dos coletores ( $W_{\eta_c}$ ).

Coletor	01	02	03	04	05
Média do $W_{\eta_c}$	2,533%	2,552%	2,524%	2,530%	2,529%
Desvio Padrão do $W_{\eta_c}$	0,881%	0,889%	0,878%	0,886%	0,896%

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Pode-se verificar na Tabela 4 que as incertezas para a medida da eficiência são pequenas, na ordem de 3%, garantindo uma boa confiabilidade dos resultados. Sendo que as incertezas para a medida da eficiência comparativas entre os coletores são ainda menores, na ordem de 2,5%, como mostra a Tabela 5.

Como os coletores eram iguais e sem alterações nos primeiros ensaios, esperava-se que o comportamento térmico fosse próximo, o que não foi verificado, conforme conclui-se com as Figuras 86 e 87, onde demonstram uma maior eficiência do coletor um, decaindo três, cinco e quatro, respectivamente.

Os possíveis motivos para essa diferença do comportamento térmico são:

- Erro dos sensores de temperatura de entrada (sistemático);
- Erro dos sensores de temperatura de saída (sistemático);
- Erro dos sensores de vazão (sistemático);
- Pequenas diferenças da espessura do isolamento da base (sistemático);
- Pequenas diferenças da espessura da tinta do absorvedor (sistemático);
- Diferença da refração dos vidros (sistemático);

- Velocidade do ar de acordo com a posição na linha de coletor (sistemático).

Desta forma, para avaliar a real mudança da eficiência dos coletores ao adicionar as barreiras em suas cavidades, foi necessário a correção destes desvios, a fim de obter um ajuste da curva da eficiência versus o parâmetro de perda de calor. Esse ajuste teve o objetivo de diminuir os parâmetros que causam a diferença do comportamento térmico, sendo calculados através da equação 3.5 e 3.6, conforme explicado no capítulo anterior.

A partir da curva de eficiência de cada coletor, foi calculado a correção dos coletores três a cinco em relação ao coletor um (coletor de referência). Os índices sem e com a correção da curva de eficiência versus o parâmetro de perda de calor são apresentados na Tabela 6 e os coeficientes usados no ajuste das curvas dos coletores três a cinco são mostrados na Tabela 7.

Tabela 6: Valores dos coeficiente da curva de eficiência dos coletores no ensaio sem barreira, sem e com correção.

Sem Barreira						
N° do Coletor	Sem Correção			Com Correção		
	$\eta_0$	$a_1$	$a_2$	$\eta_0$	$a_1$	$a_2$
1	78.71	577.32	-0,0027	78.71	577.32	-0,0027
3	79.08	632.21	-0,0027	78.74	578.20	-0,0027
4	74.73	812.78	-0,0027	78.75	578.65	-0,0027
5	73.03	651.94	-0,0027	78.72	577.68	-0,0027

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

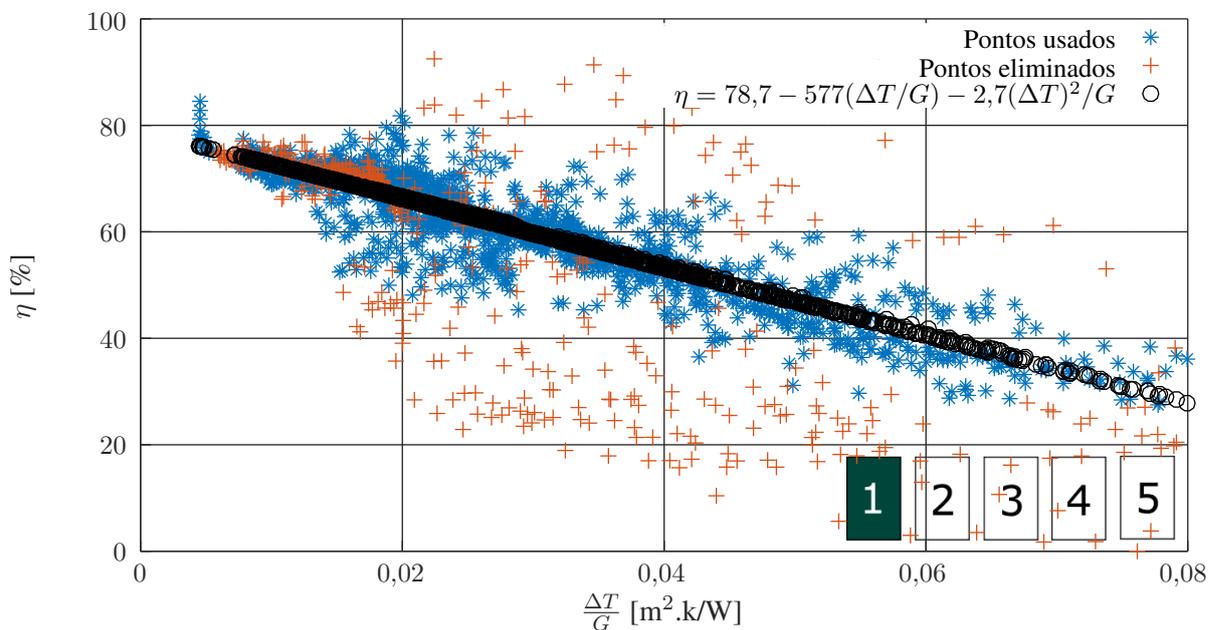
Tabela 7: Valores dos coeficientes de correção da curva de eficiência dos coletores dois a cinco em relação ao coletor um (referência).

N° do Coletor	$ca_1$	$ca_2$	$ca_3$
3	1.09986	-0.01142	6.77675
4	1.36149	-0.01600	14.28455
5	1.14138	-0.01582	15.38340

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

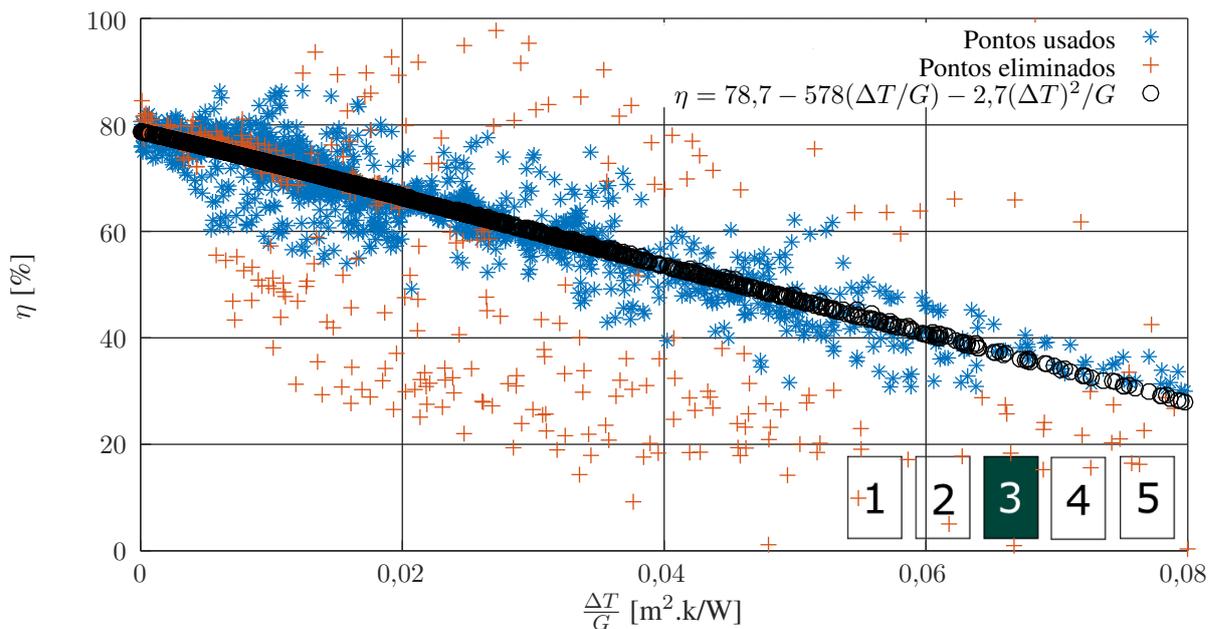
A ilustração das curvas antes da correção é mostrada no Apêndice E e a ilustração das curvas depois da correção são mostrada nas Figuras 88 a 91 para cada coletor. Observou-se que o padrão da curva dos coletores após o ajuste ficou próximo.

Figura 88: Eficiência pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão (posição 1).



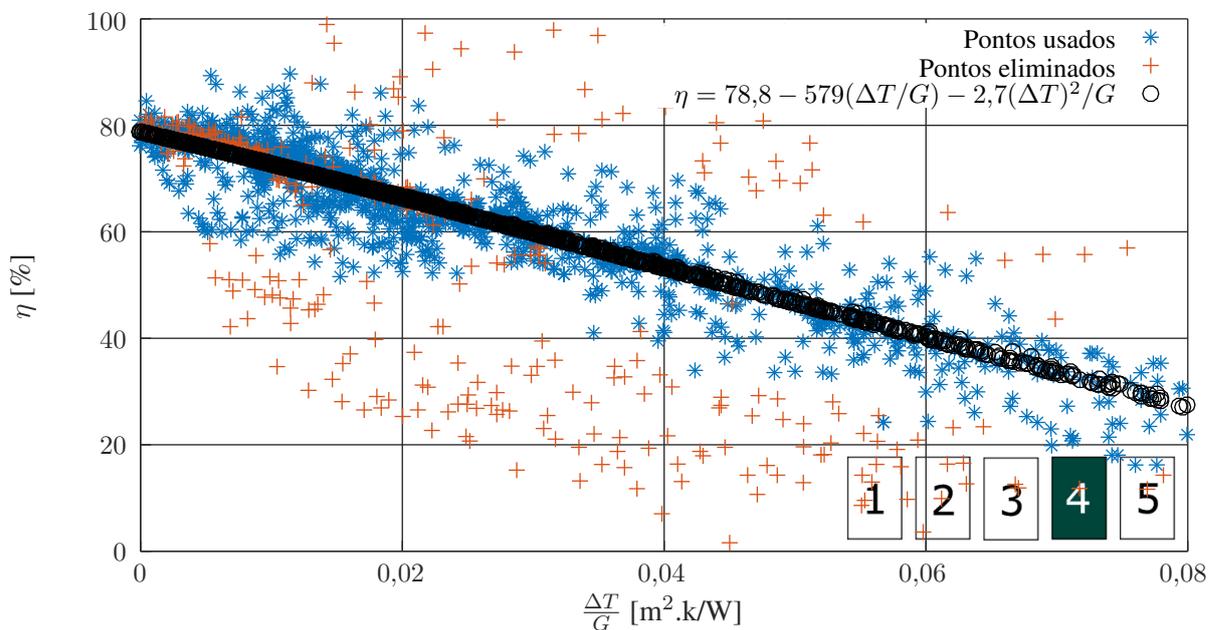
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 89: Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 3.



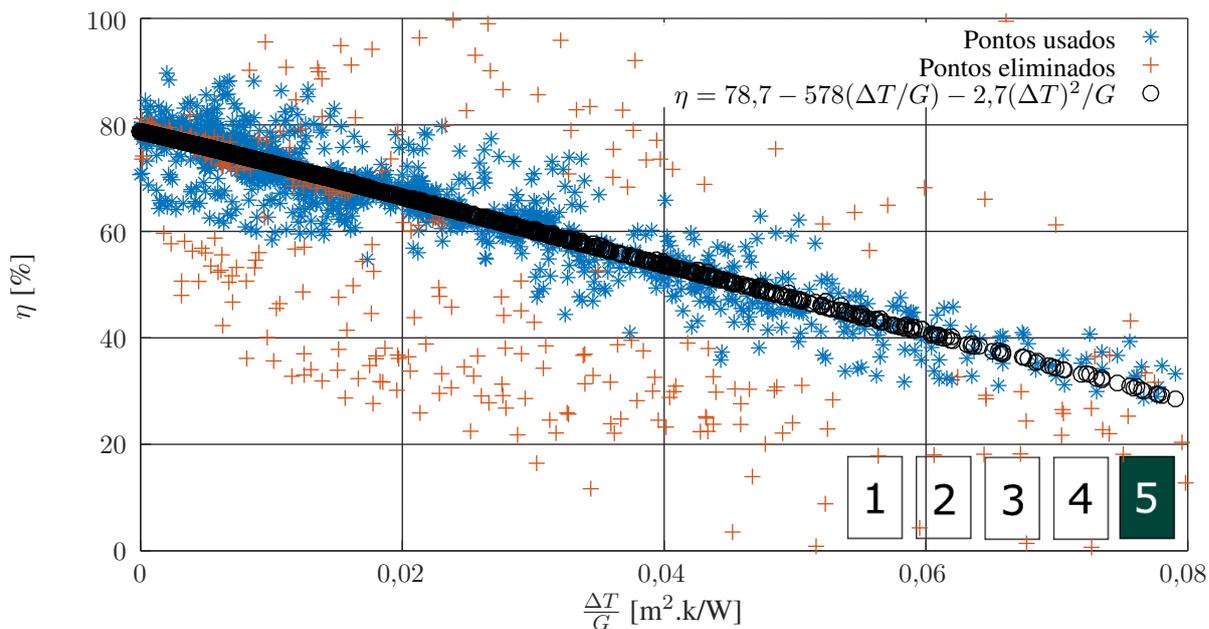
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 90: Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 4.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 91: Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 5.



Fonte: O próprio autor, 2019.

## 4.2 Resultado Com Barreira

Após os ensaios iniciais, foram introduzidas as barreiras nos coletores. A Tabela 8 ilustra o número dos coletores, as quantidades de barreiras e as quantidades de cavidades do conjunto ensaiado, a fim de melhorar o entendimento dos resultados.

Tabela 8: Arranjo dos coletores solares ensaiados.

N° do Coletor	N° de Barreiras	N° de Cavidades
01	0	1
02	1	2
03	2	3
04	3	4
05	4	5

*Fonte: O próprio autor, 2019.*

Os coletores com barreiras foram ensaiados com a mesma metodologia e cálculos (filtros, etc) dos ensaios sem barreira.

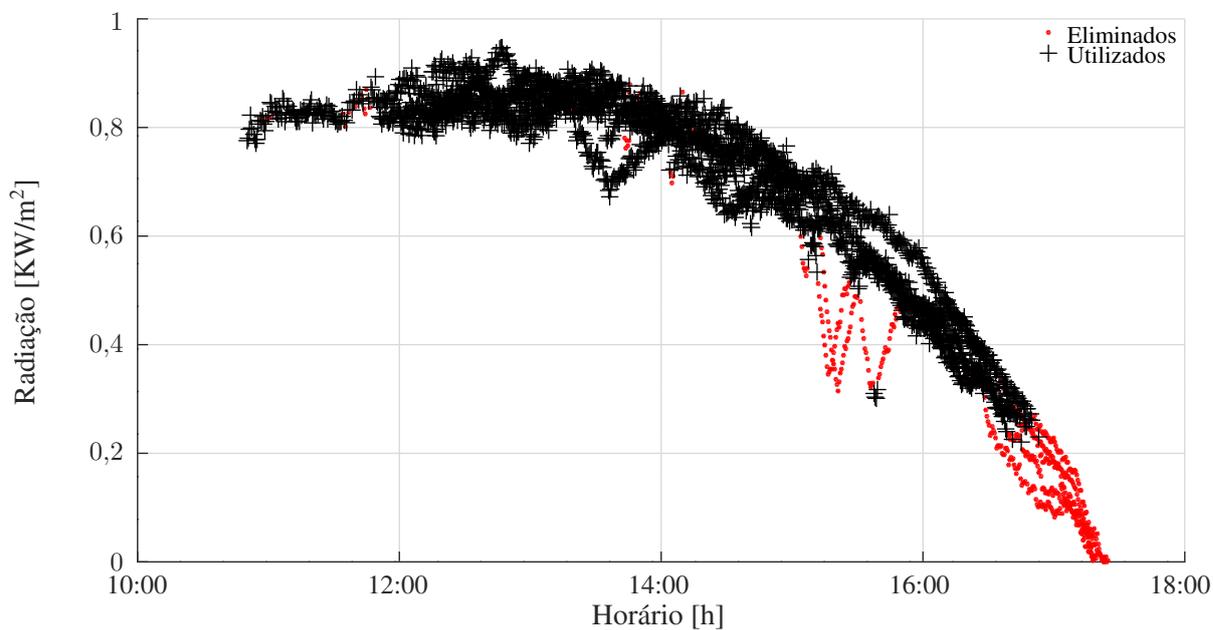
O período da coleta foi nas primeiras semanas do mês de julho de 2018, analogamente aos ensaios sem barreira, os dias em que não houveram uma boa radiação solar, chuva ou algum motivo que atrapalhou a coleta, os dados não foram coletados ou foram descartados, desta forma, os dados foram coletados apenas nos dias 1 a 5, 10 a 19 e 24 de julho de 2018.

As Figuras 92 e 93 mostram a radiação solar e temperatura ambiente para os dias ensaiados, a qual pôde-se observar que as condições climáticas estavam próximas das condições dos ensaios sem barreira.

Os resultados da eficiência versus o parâmetro de perda de calor são apresentados nas Figuras 94 a 97, sendo que os coletores três a cinco foram aplicados as correções calculadas nos ensaios sem barreiras, desta forma pôde-se observar a real influência das barreiras. A Tabela 9 mostra os valores dos coeficientes de cada curva, onde pôde-se comparar os  $\eta_0$  e  $a_1$  de cada coletor.

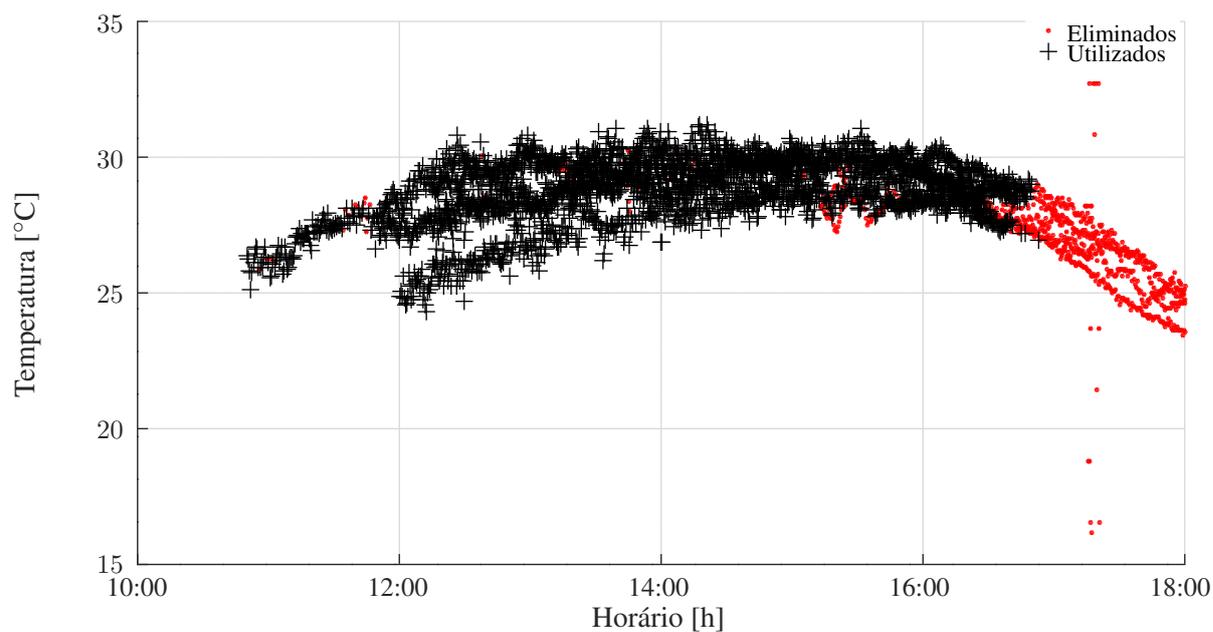
Nas Figuras 94 a 97, a intercepção, ponto de interseção da linha de tendência da eficiência com o eixo vertical, é o ponto onde a temperatura de entrada do fluido é igual a temperatura ambiente, sendo o ponto de maior eficiência do coletor. E o ponto onde a eficiência do coletor é igual a zero está na interseção da linha de tendência da eficiência com o eixo horizontal. Logo, pode-se observar dois aspectos de interesse nesses gráficos. A intercepção e a inclinação. O ponto de intercepção, indica a absorção da radiação solar no coletor na situação sem perdas térmicas. A linha de tendência, por sua vez, está associada à perda de calor para o meio ambiente.

Figura 92: Radiação nos ensaios com barreira.



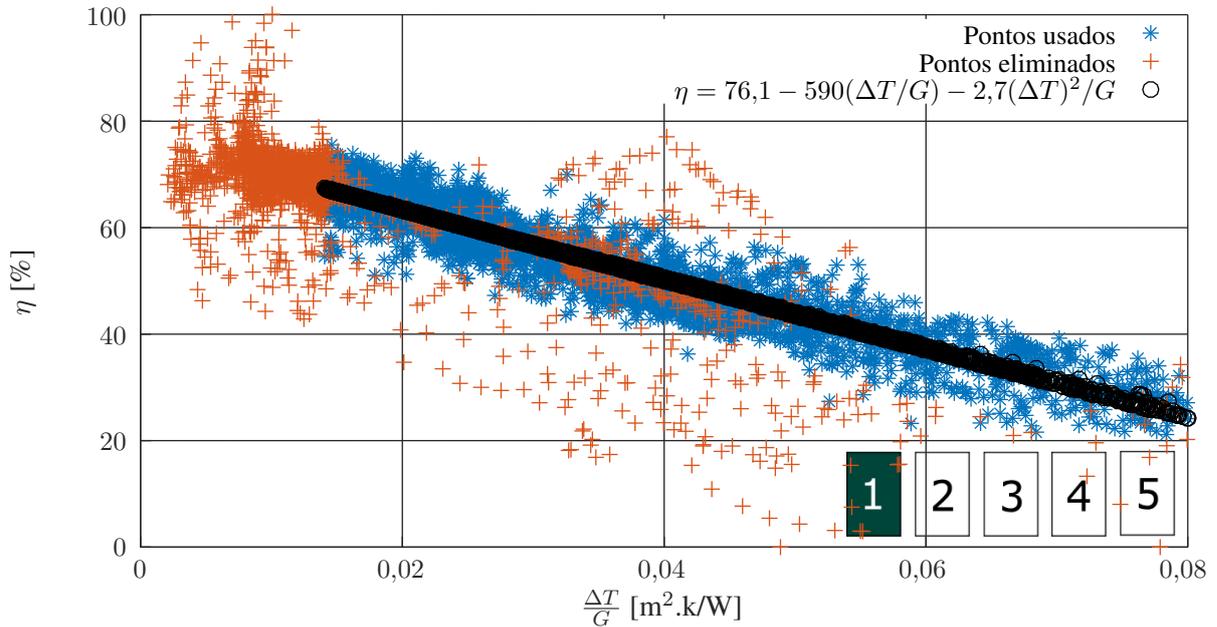
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 93: Temperatura ambiente nos ensaios com barreira.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 94: Eficiência pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão (posição 1).



Fonte: O próprio autor, 2019.

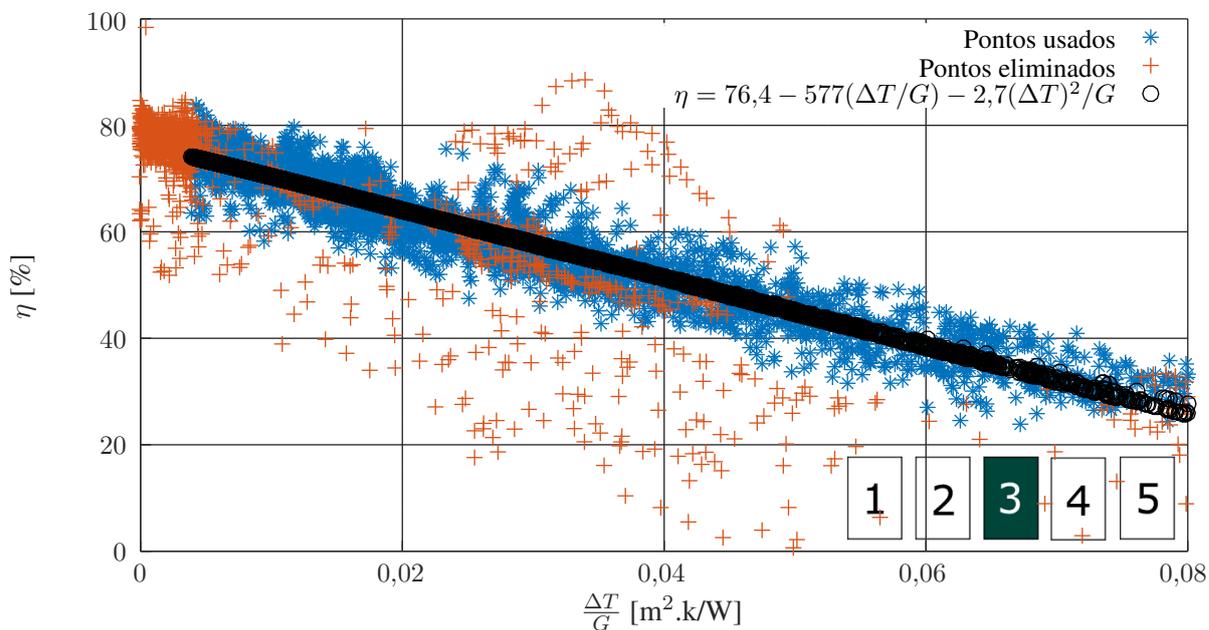
Tabela 9: Valores dos coeficiente da curva de eficiência dos coletores no ensaio com barreira e com correção.

Com Barreira e Com Correção			
Coletor	$\eta_0$	$a_1$	$a_2$
01	76,10	589,50	-0,0027
03	76,37	577,40	-0,0027
04	76,93	559,29	-0,0027
05	76,05	606,81	-0,0027

Fonte: O próprio autor, 2019.

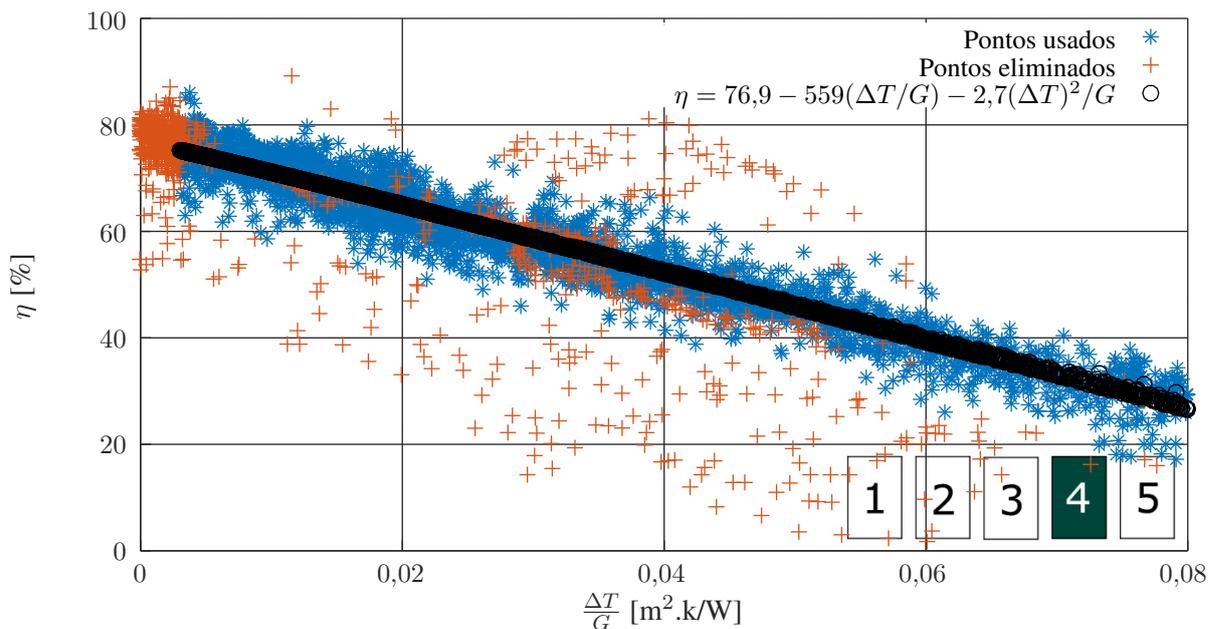
Na Figura 98 pode-se analisar da linha de tendência da eficiência dos 4 coletores, onde fica evidente a congruência no ponto de intercepção. Também fica evidente a variação da inclinação da linha de tendência da eficiência, a qual a inclinação aumenta quando o curva do coletor de barreira (referência) em relação aos coletores com duas e três barreira, mas diminui em relação ao coletor com quatro barreiras.

Figura 95: Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 3.



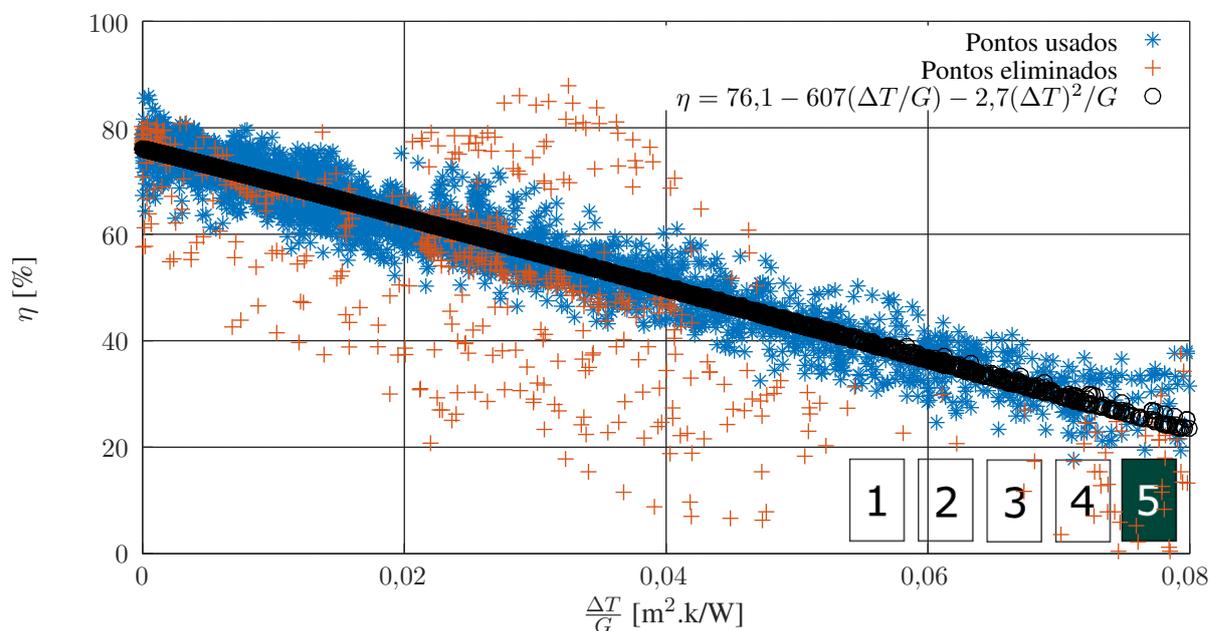
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 96: Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 4.



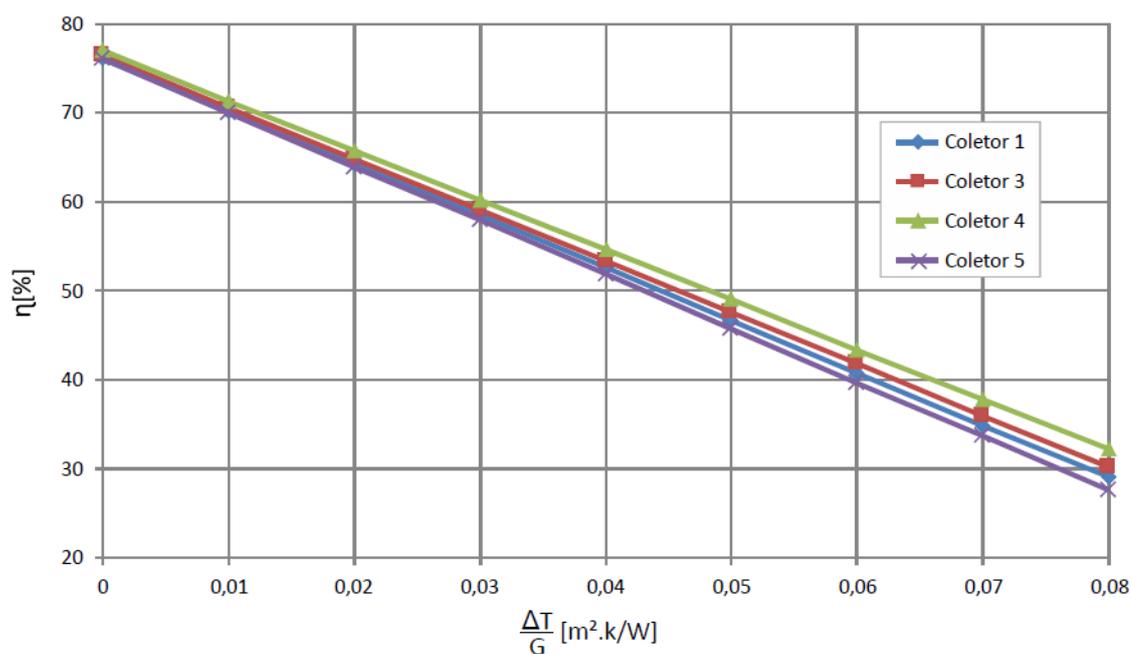
Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 97: Eficiência corrigida pelo parâmetro de perda de calor do coletor padrão na posição 5.



Fonte: O próprio autor, 2019.

Figura 98: Comparação das eficiências corrigidas pelo parâmetro de perda de calor.



Fonte: O próprio autor, 2019.

# Capítulo 5

## Conclusão

No presente trabalho foram apresentados os resultados experimentais da eficiência térmica de coletor solar plano, obtidas de uma bancada de ensaio apropriada para este tipo de equipamento. Foi analisado e comparado o comportamento térmico sem e com barreiras no interior das cavidades do coletor solar, afim de diminuir os espaços do confinamento de ar, bloqueando a sua circulação.

Durante os ensaios foram coletados os dados das vazões, das temperaturas de entrada e saída dos coletores, da radiação, da temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade do relativa do ar na bancada de ensaio. Com esses dados foram calculadas as eficiências de cada arranjo dos coletores solares.

Os gráficos mostrados nas Figuras 94 a 97 são primordiais na avaliação de coletor solar plano, sendo possível verificar o comportamento de absorção e perda de energia térmica. Essa análise é fundamental para a escolha de coletores mais apropriado para cada tipo de aplicação desejada.

Com base nos resultados obtidos, no coletor sem barreira (coletor referência) e nos coletores com barreiras, concluiu-se que:

- A intercepção não foi alterada significativamente, não havendo uma influência na absorção da radiação solar. Esse comportamento era esperado conforme os trabalhos de [Bentivenha \(2005\)](#) e [Garcia \(2014\)](#). Além disso, é preciso considerar o fato da área superior das barreiras (área perpendicular a radiação direta) ser muito pequena em relação a área da superfície do coletor. A área superior tem dimensão de 1000 mm de comprimento por 4 mm de espessura, ou seja, uma área igual a  $4 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ . Já o coletor possui uma área de superfície transparente igual a  $1,923 \text{ m}^2$ , assim, mesmo o "coletor 5" que possui 4 barreiras, a área total das barreiras representaria menos de 0,001%. Além disso, o fato das barreiras não estarem em contato com a cobertura de vidro e serem transparentes, não acarretou no bloqueio da passagem da radiação solar;
- A influência da inclinação da linha de tendência da curva de eficiência foi relevante, diminuindo 2,05% com o adcionamento de duas barreiras (coletor 3), diminuindo ainda mais, em

5,12% com o adicionamento de três barreiras (coletor 4). Porém, ao aumentar para quatro barreiras houve um aumento de 2,94%. Assim, concluiu-se que o adicionamento de barreiras diminui a perda de calor do coletor, porém há um número ótimo de barreiras a serem adicionadas, a qual a perda é mínima. Esse comportamento também foi observado no estudo de [Garcia \(2014\)](#);

- Coletores com menor ângulo de inclinação são aplicados em regiões frias, onde a maior diferença de temperatura do coletor com o ambiente provoca maiores perdas térmicas, com isso, coletores com maior rendimento são necessários e as barreiras uma excelente alternativa.
- Em locais com pouco espaço disponível para a instalações de coletores solares, o uso de barreiras também é uma vertente importante, haja visto que menos coletores seriam necessário com o aumento da eficiência.
- A calibração dos sensores de temperatura, vazão d'água e radiação permitiu uma redução significativa da incerteza da eficiência dos coletores, validando o procedimento experimental adotado.

O projeto se mostrou satisfatório cumprindo com o objetivo da proposta deste estudo, porém, seguem algumas sugestões para melhorias futuras:

- Conforme a revisão da literatura em TIMs, há diversos tipos de arranjos para serem instalados como barreiras. Esta investigação possibilitará a verificação da eficiência térmica do coletor solar com outros tipos de arranjos;
- Adicionamento de barreiras na superfície externas do vidro, para diminuir a influência do escoamento do ar (perda por convecção externa);
- Ensaios com temperatura controlada da água de entrada nos coletores, possibilitando a verificação do comportamentos térmicos dos coletores solares com outras variáveis de entrada;
- Ensaios com coletores solares de diferentes dimensões, tanto no comprimento quanto na largura e espessura, ou seja, avaliando os resultado com a influência dessas características.
- Uma análise do impacto econômico, analisando o aumento do custo do adicionamento das barreiras nos coletores versus o aumento da eficiência, ou seja, o quanto o aumento da energia térmica compensaria o custo adicional na fabricação do coletor.

# Referências Bibliográficas

- ABRAVA. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, junho 2018. URL <http://abrava.com.br>. Citado na página 4.
- ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, junho 2016. URL <http://absolar.org.br>. Citado na página 5.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 15747-2: Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores Solares. Parte2: Métodos de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. ISBN 978-85-07-01683-0. Citado 6 vezes nas páginas 25, 27, 38, 50, 61 e 66.
- Avallone, Elson; Mioralli, Paulo César; Scalon, Vicente Luiz; Padilha, Alcides & Oliveira, Santiago del Rio. Thermal Pyranometer Using the Open Hardware Arduino Platform. *International Journal of Thermodynamics*, 21(1):1–5, março 2018. doi: 10.5541/ijot.5000209000. URL <http://dergipark.gov.tr/ijot/400063>. Citado na página 34.
- Baetens, Ruben; Jelle, Björn Petter & Gustavsen, Arild. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4):761–769, abril 2011. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.012. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810004329>. Citado na página 20.
- Bentivenha, Luiz Carlos [UNESP. Determinação da eficiência de um coletor solar plano com aletas de vidro. Master's thesis, janeiro 2005. URL <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/90592>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 85.
- Bergman, Theodore & Lavine, Andrienne. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. LTC, edição: 7<sup>a</sup>, nova edição, janeiro 2014. ISBN 978-85-216-2504-9. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 22.
- Cuce, E.; Cuce, P.M.; Wood, C.J. & Riffat, S.B. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34:273–299, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.017. Citado na página 20.

- Duffie, John A. & Beckman, William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Hoboken, edição: 4th, 2013. ISBN 978-0-470-87366-3. Citado 6 vezes nas páginas 4, 5, 6, 7, 10 e 22.
- Edwards, D. K.; Arnold, J. N. & Catton, I. End-clearance effects on rectangular-honeycomb solar collectors. *Solar Energy*, 18(3):253–257, janeiro 1976. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(76)90024-4. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X76900244>. Citado na página 23.
- Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. Technical report, Ministério de Minas e Energia, junho 2016. URL <http://www.epe.gov.br>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.
- ENERDATA. Global Energy Statistical Yearbook, junho 2018. URL <https://yearbook.enerdata.net>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- FERRARI ltda. Imagem da Bomba D'água, junho 2018. URL <http://www.ferrarinet.com.br>. Citado na página 31.
- Gao, Wenfeng; Lin, Wenxian & Lu, Enrong. Numerical study on natural convection inside the channel between the flat-plate cover and sine-wave absorber of a cross-corrugated solar air heater. *Energy Conversion and Management*, 41(2):145–151, 2000. ISSN 0196-8904. URL [www.elsevier.com/locate/enconman](http://www.elsevier.com/locate/enconman). Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- Garcia, Rafael Paiva. Estudo da convecção natural no interior de cavidades para aplicação em isolamento transparente de coletor solar plano. Master's thesis, Faculdade de Engenharia/UNESP, julho 2014. URL <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/115974?show=full>. Citado 5 vezes nas páginas 22, 23, 24, 85 e 86.
- Garcia, Rafael Paiva; Bollini, Laura Elisa; Padilha, Alcides & Scalon, Vicente Luiz. Thermal analysis of convection losses by changing baffle spacing in a cavity. In *Proceedings of the International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*. ABCM, 2013. URL [http://abcm.org.br/anais/cobem/2013/\\_web/](http://abcm.org.br/anais/cobem/2013/_web/). Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- Garcia, Rafael Paiva; Avallone, Elson; Pansanato, Cristiano; Gonçalves, Guilherme Biazzzi; Ito, Mario Cesar & Scalon, Vicente Luiz. Thermal radiometer using lm35 analog sensors connected to an arduino board. In *17th Brazilian Congress of Thermal Sciences Engineering (ENCIT 2018)*. ABCM, 2018. Citado na página 34.
- Gonçalves, Guilherme Biazzzi. Análise numérica de uma geometria de coletor solar para sistemas de aquecimento de água. Master's thesis, Faculdade de Engenharia/UNESP, fevereiro 2016.

- URL <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/136378>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- Gravity. Sensor Shield For Arduino Mega Due, junho 2018. URL <https://thepihut.com/products/gravity-io-sensor-shield-for-arduino-mega-due>. Citado na página 47.
- Hirasawa, Shigeki; Tsubota, Ryohei; Kawanami, Tsuyoshi & Shirai, Katsuaki. Reduction of heat loss from solar thermal collector by diminishing natural convection with high-porosity porous medium. *Solar Energy*, 97:305–313, novembro 2013. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/j.solener.2013.08.035. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13003459>. Citado na página 20.
- Hollands, K. G. T. Honeycomb devices in flat-plate solar collectors. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1, 1965. ISSN 0017-93103. Citado 3 vezes nas páginas 15, 21 e 22.
- Hollands, K. G. T. & Iynkaran, K. Proposal for a compound-honeycomb collector. *Solar Energy*, 34(4):309–316, janeiro 1985. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(85)90044-1. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X85900441>. Citado na página 23.
- Holman, Jack. *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill Education, Department of Mechanical Engineering Southern Methodist University, 8th , 2001. ISBN 978-0-07-352930-1. Citado na página 64.
- Horta, P. Henriques, J. & Collares, P. M. Impact of different internal convection control strategies in a non-evacuated CPC collector performanc. *Solar Energy*, 86:1232–1244, 2012. Citado na página 20.
- Hussain, F.; Othman, M. Y. H.; Yatim, B.; Ruslan, H.; Sopian, K.; Anuar, Z. & Khairuddin, S. An improved design of photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 122:885–891, dezembro 2015. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/j.solener.2015.10.008. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15005411>. Citado na página 20.
- Jia, H.; Zhu, J.; Debeli, D.K.; Li, Z. & Guo, J. Solar thermal energy harvesting properties of spacer fabric composite used for transparent insulation materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174:140–145, 2018. doi: 10.1016/j.solmat.2017.08.039. Citado na página 20.
- Jones, Trevor H. & Willms, N. Brad. A critique of Hubbert’s model for peak oil. *FACETS*, 3(1): 260–274, 2018. ISSN 2371-1671. doi: 10.1139/facets-2017-0097. Citado na página 4.

- Kalogirou, Soteris. *Engenharia de Energia Solar*. Elsevier, edição: 1ª, maio 2016. ISBN 978-85-352-8004-3. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 60.
- Kessentini, H.; Capdevila, R.; Castro, J.; Oliva, A. & Bouden, C. Three dimensional heat transfer analysis of combined conduction and radiation in honeycomb transparent insulation. *Solar Energy*, 105:58–70, 2014. doi: 10.1016/j.solener.2014.02.027. Citado na página 21.
- Koulibaly, Amadou; Bayón, González & José, Juan. Modelación de un colector solar para calentamiento de aire. *Ingeniería Energética*, 36(3):292–302, dezembro 2015. ISSN 1815-5901. URL [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1815-59012015000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1815-59012015000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es). Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- Marcus, Steven L. An approximate method for calculating the heat flux through a solar collector honeycomb. *Solar Energy*, 30(2):127–131, janeiro 1983. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(83)90204-9. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X83902049>. Citado na página 21.
- Nahar, N.M. M & Garg, H.P. P. Free convection and shading due to gap spacing between an absorber plate and the cover glazing in solar energy flat-plate collectors. *Applied Energy*, 7(1):129–145, nov 1980. ISSN 0306-2619. doi: 10.1016/0306-2619(80)90054-9. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0306261980900549?via3Dihub>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- Niku, Saeed B. *Introdução à Robótica: Análise, Controle, Aplicações*. LTC Editora, edição: 2, fevereiro 2013. ISBN 978-85-216-2237-6. Citado na página 38.
- Osorio, Julian D.; Rivera-Alvarez, Alejandro; Girurugwiro, Philibert; Yang, Sam; Hovsapiian, Rob & Ordonez, Juan C. Integration of transparent insulation materials into solar collector devices. *Solar Energy*, 147:8–21, maio 2017. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/j.solener.2017.03.011. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17301688>. Citado na página 20.
- Pansanato, Cristiano; Gonçalves, Guilherme Biazzi; Ito, Mario Cesar; Scalon, Vicente Luiz; Avalone, Elson & Garcia, Rafael Paiva. Lowcost thermal pyranometer using dallas ds18b20 sensor and arduino. In *17th Brazilian Congress of Thermal Sciences Engineering (ENCIT 2018)*. ABCM, 2018. Citado na página 34.
- Pereira, Elizabeth Marques Duarte. *Energia solar térmica: instalação solares de pequeno porte. (Apostila)*. GREEN Solar/PUC-MG, Belo Horizonte, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

- Peuportier, Bruno & Michel, Jacques. Comparative analysis of active and passive solar heating systems with transparent insulation. *Solar Energy*, 54(1):13–18, janeiro 1995. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(94)00112-Q. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9400112Q>. Citado na página 20.
- Platzer, W. J. Calculation procedure for collectors with a honeycomb cover of rectangular cross section. *Solar Energy*, 48(6):381–393, janeiro 1992. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(92)90047-E. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9290047E>. Citado na página 23.
- Riffel, D.B.; Andrade, R.R.D.; Domingos, P.V.S.R.; Belo, F.A. & Leite, A.P.F. Comparative study on transmittance of transparent coverings for solar collectors. In *29th ISES Biennial Solar World Congress 2009, ISES 2009*, volume 1, pages 772–780, 2009. ISBN 9781617388521. Citado na página 21.
- Rommel, M. & Wagner, A. Application of transparent insulation materials in improved flat-plate collectors and integrated collector storages. *Solar Energy*, 49(5):371–380, novembro 1992. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(92)90109-N. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9290109N>. Citado na página 20.
- SOLARGIS. Empresa de fornecimento de dados de energia solar e meteorológica., junho 2018. URL <https://solargis.com>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- Sun, Y.; Wilson, R. & Wu, Y. A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort. *Applied Energy*, 226:713–729, 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.094. Citado na página 20.
- Taylor, John R. *Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books, Sausalito, Calif, edição: 2nd edition, janeiro 1997. ISBN 978-0-935702-75-0. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 63.
- Varol, Yasin & Oztop, Hakan F. A comparative numerical study on natural convection in inclined wavy and flat-plate solar collectors. *Building and Environment*, 43(9):1535–1544, 2008. ISSN 0360-1323. Citado na página 17.
- Vestlund, J.; Rönnelid, M. & Dalenbäck, J. Thermal performance of gas-filled flat plate solar collectors. *Solar Energy*, 83:896–904, 2009. Citado na página 20.
- Wong, I L; Eames, P C & Perera, R S. A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. *Solar Energy*, 81(9):1058–1071, 2007.

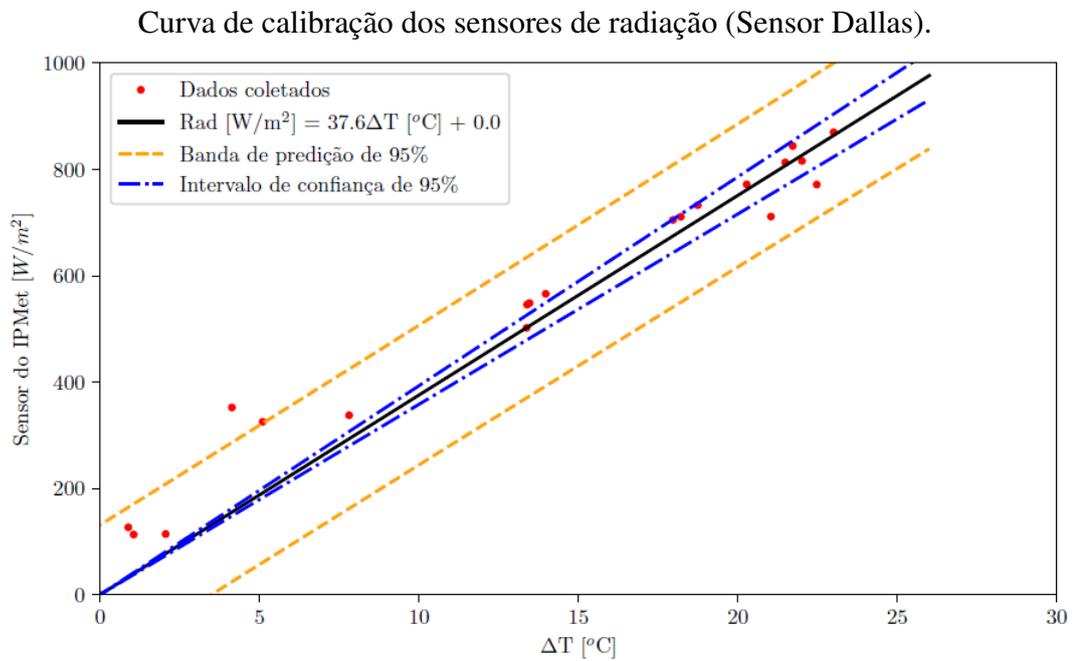
ISSN 0038-092X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07000850>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

Wong, I.L. & Eames, P. A method for calculating the solar transmittance, absorptance and reflectance of a transparent insulation system. *Solar Energy*, 111:418–425, 2015. doi: 10.1016/j.solener.2014.09.028. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

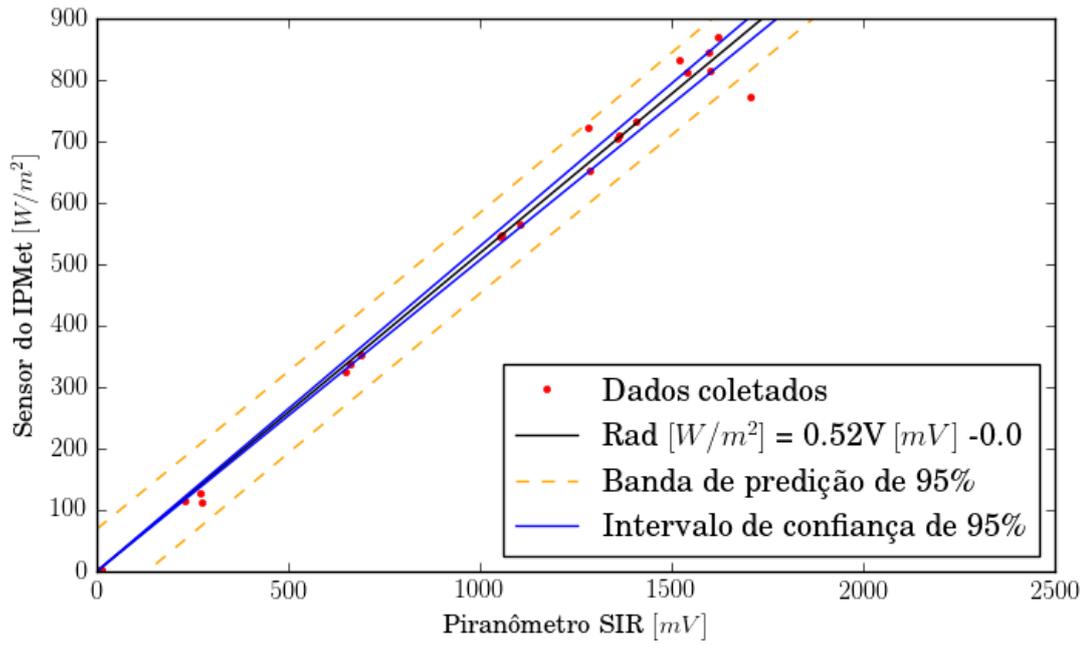
# Apêndices

# Apêndice A

## Curva de calibração dos sensores de radiação.

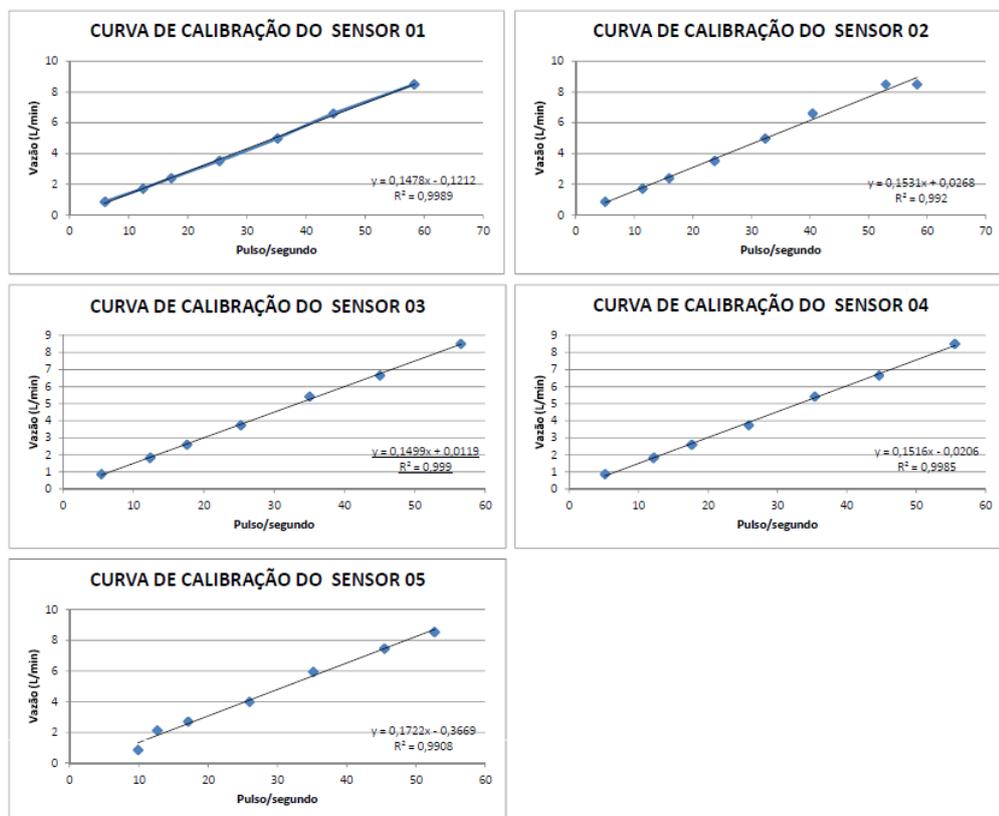


Curva de calibração dos sensores de radiação (Sensor SIR).



# Apêndice B

## Curva de calibração dos sensores de vazão.



Incertezas dos coeficientes da curva de calibração dos sensores de vazão utilizados.

Sensor de vazão do coletor	Incerteza do coeficiente quadrático ( $W_{CV_1}$ )	Incerteza do coeficiente linear ( $W_{CV_2}$ )
1	1,872E-08	5,267E-08
2	6,232E-07	1,648E-06
3	1,816E-08	5,977E-07
4	2,265E-08	7,408E-07
5	6,333E-08	2,045E-06

## **Apêndice C**

### **Script da programação do controlador Arduino Mega**

```

// Programa para automação da bancada de ensaio
// UNESP - FEB
// Rafael Paiva Garcia
// Vicente Luiz Scalon
//*****
int cont; // Variável para contagem
float pulsos01;
float media01=0;
float pulsos02;
float media02=0;
float pulsos03;
float media03=0;
float pulsos04;
float media04=0;
float pulsos05;
float media05=0;
float vazao=0;
int n=4;
int contaPulso=0;
int i=0;
int j=0;
int periodo;
long timeold;
long timeloop=1000;
float dif;
#include <Stepper.h>
const int stepsPerRevolution = 500;
int m01 = 0;
int m02 = 0;
int m03 = 0;
int m04 = 0;
int m05 = 0;
float delta = 0.5;
float vr1 = 15.96;
float vr2 = 15.50;
float vr3 = 15.93;
float vr4 = 16.04;
float vr5 = 16.07;
int m01pin[] = {32, 30, 28, 26}; int m02pin[] = {22, 23,
25, 24}; int m03pin[] = {33, 31, 29, 27}; int m04pin[] =
{41, 39, 37, 35}; int m05pin[] = {49, 47, 45, 43};
#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>
#define bloco1 10
#define bloco2 11
#define TEMPERATURE_PRECISION 12
OneWire Wire_Bloco1(bloco1);
"Wire_Bloco1(<PINO>)" DA CLASSE "OneWire
OneWire Wire_Bloco2(bloco2);
"Wire_Bloco2(<PINO>)" DA CLASSE "OneWire
DallasTemperature sensor_bloco1(&Wire_Bloco1);
DallasTemperature sensor_bloco2(&Wire_Bloco2);
DeviceAddress Sensor_Bloco1[] = {{0x28, 0x60, 0x76,
0xB4, 0x05, 0x00, 0x00, 0x86 }, { 0x28, 0xFF, 0x20,
0x1D, 0x92, 0x15, 0x03, 0x83 }, { 0x28, 0xC6, 0x7C,
0x66, 0x04, 0x00, 0x00, 0x78 }, { 0x28, 0x13, 0x7B,
0x66, 0x04, 0x00, 0x00, 0x06 }, { 0x28, 0x19, 0xBE,
0x66, 0x04, 0x00, 0x00, 0x39 }, { 0x28, 0xFF, 0x92,
0x27, 0x05, 0x16, 0x03, 0x1B }, { 0x28, 0xFF, 0xC4,
0x56, 0x92, 0x15, 0x03, 0x32 }, { 0x28, 0xFF, 0xF4,
0x1D, 0x92, 0x15, 0x03, 0xC2 }};
DeviceAddress Sensor_Bloco2[] = {{0x28, 0xFF, 0xCE,
0x25,0x05, 0x16, 0x03, 0xA8 }, { 0x28, 0xFF, 0x6E,
0x2F,0x92, 0x15, 0x03, 0x87 }, { 0x28, 0xBC, 0xA2,
0xB4,0x05, 0x00, 0x00, 0x7E }, { 0x28, 0x32, 0x98,
0x66,0x04, 0x00, 0x00, 0x13 }, { 0x28, 0xAE, 0x55,
0xB4,0x05, 0x00, 0x00, 0xBC }, { 0x28, 0x07, 0x73,
0xB4,0x05, 0x00, 0x00, 0x12 }, { 0x28, 0xFF, 0xEB,
0x75,0x92, 0x15, 0x03, 0x5D }, { 0x28, 0xFF, 0xEB,
0x75,0x92, 0x15, 0x03, 0x5D }};
int nst = 8;
float temp_sonda[16];
float pulsos08;
float media08=0;
int Pin0 = A0;
float mediaA0 = 0;
#include <dht.h>
dht DHT;
uint32_t timer = 0;
float TA=0;
float U=0;
int RadPin = A1;
float RadSIR = 0;
float mediaSIR = 0;

```

```

float VoltageSIR = 0;
float RadiacaoSIR=0;
int nr=5;
int cont2=0;
#include <DS1307.h>
DS1307 rtc(A4, A5);
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
File dados;
#define FILENAME "dados.txt"
const int buzzer = 12;
const int ledverde = 13;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(RelePin, OUTPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(4, INPUT);
  pinMode(5, INPUT);
  pinMode(6, INPUT);
  pinMode(7, INPUT);
  for (i = 0; i < 4; i++) {
    pinMode(m01pin[i], OUTPUT);}
  for (i = 0; i < 4; i++) {
    pinMode(m02pin[i], OUTPUT);}
  for (i = 0; i < 4; i++) {
    pinMode(m03pin[i], OUTPUT);}
  for (i = 0; i < 4; i++) {
    pinMode(m04pin[i], OUTPUT);}
  for (i = 0; i < 4; i++) {
    pinMode(m05pin[i], OUTPUT);}
  sensor_bloco1.begin();
  sensor_bloco2.begin();
  for (int i=0;j<7;i++){
    sensor_bloco1.setResolution(Sensor_Bloco1[i],
    TEMPERATURE_PRECISION);
    sensor_bloco2.setResolution(Sensor_Bloco2[i],
    TEMPERATURE_PRECISION);}
  pinMode(8, INPUT);
  rtc.halt(false);
  rtc.setSQWRate(SQW_RATE_1);
  rtc.enableSQW(true);
  Serial.print("Iniciando SD...");

  pinMode(53, OUTPUT);
  if (!SD.begin(53)) {
    return;}
  if(!SD.exists("dados.txt")){
    dados = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE);
    if (dados){
      Serial.print("Criando um arquivo dados.txt...");
      dados.println("teste DO SERIAL");
      dados.close();
      Serial.println("fim de escrita.");}else{}}
  pinMode(buzzer,OUTPUT);
  pinMode(ledverde, OUTPUT);}
void loop (){
  media01=0;
  for (int j=0;j<n;j++){
    periodo=pulseIn(7,HIGH);
    timeold=millis();
    while (millis()-timeold<timeloop){
      periodo=pulseIn(7,HIGH);
      if(periodo!=0){
        contaPulso++;}}
    pulsos01 = 1000.0*contaPulso/(millis()-timeold);
    vazao=pulsos01;
    if (pulsos01==0){
      vazao=0;}
    media01=media01+vazao;
    contaPulso=0;}
  media01=media01/n;
  if (media01 < (vr1-delta) ){
    dif = vr1 - media01;
    delay(500);
    while (cont<1) {
      digitalWrite(aa, HIGH);
      delay(50);
      digitalWrite(aa, LOW);
      digitalWrite(bb, HIGH);
      delay(50);
      digitalWrite(bb, LOW);
      digitalWrite(cc, HIGH);
      delay(50);
      digitalWrite(cc, LOW);
      digitalWrite(dd, HIGH);

```

```

delay(50);
digitalWrite(dd, LOW);
cont++;
cont =0;}
if (media01 > (vr1+delta) ){
dif = vr1 - media01 ;
delay(500);
while (cont<1) {
digitalWrite(dd, HIGH);
delay(50);
digitalWrite(dd, LOW);
digitalWrite(cc, HIGH);
delay(50);
digitalWrite(cc, LOW);
digitalWrite(bb, HIGH);
delay(50);
digitalWrite(bb, LOW);
digitalWrite(aa, HIGH);
delay(50);
digitalWrite(aa, LOW);
cont++;
cont =0;}
delay (500);
//-----
// Repete os comandos p/ os sensores de vazão 2 a 4
//-----
sensor_bloco1.requestTemperatures();
for (int i=0;i<nst;i++){ //nst = número de sensores
de temperatura por bloco
temp_sonda[i]=sensor_bloco1.getTempC(Sensor_Bloc
o1[i]);}
sensor_bloco2.requestTemperatures();
for (int i=0;i<nst;i++){
temp_sonda[i+nst]=sensor_bloco2.getTempC
(Sensor_Bloco2[i]);}
delay(1000);
media08=0;
for (int j=0;j<n;j++){
periodo=pulseIn(8,HIGH);
timeold=millis();
while (millis()-timeold<timeloop){
periodo=pulseIn(8,HIGH);
if(periodo!=0){
contaPulso++;}}
pulsos08 = 1000.0*contaPulso/(millis()-timeold);
vazao=pulsos08;
if (pulsos08==0){
vazao=0;}
media08=media08+vazao;
contaPulso=0;}
media08=media08/n;
delay (500);
mediaA0=0;
j=0;
for (int j=0;j<n;j++){
periodo=analogRead(Pin0);
mediaA0 = periodo + mediaA0;
delay (100);}
mediaA0=mediaA0/(n);
delay (500);
DHT.read11(A2); TA = DHT.temperature;
U = DHT.humidity;
delay(500);
cont=0;
mediaSIR = 0;
while ( cont<5){
delay(500);
RadSIR = analogRead(RadPin);
mediaSIR = mediaSIR + RadSIR;
++cont;}
mediaSIR=mediaSIR/5;
VoltageSIR = ((mediaSIR) * 0.125)/1000;
RadiacaoSIR = ((mediaSIR) * 0.125)*0.52;
delay (500);
dados = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE);
if (dados){
dados.print("Hora, "); dados.print
(rtc.getTimeStr());
dados.print(", Data, "); dados.print
(rtc.getDateStr(FORMAT_SHORT));
dados.print(", Vazao01, ");
dados.print(media01);
dados.print(", Vazao02, ");
dados.print(media02);

```

```

dados.print(", Vazao03, ");
dados.print(media03);
dados.print(", Vazao04, ");
dados.print(media04);
dados.print(", Vazao05, ");
dados.print(media05);
dados.print(", Temperatura01, ");
dados.print(temp_sonda[0]);
dados.print(", Temperatura02, ");
dados.print(temp_sonda[1]);
dados.print(", Temperatura03, ");
dados.print(temp_sonda[2]);
dados.print(", Temperatura04, ");
dados.print(temp_sonda[3]);
dados.print(", Temperatura05, ");
dados.print(temp_sonda[4]);
dados.print(", Temperatura06, ");
dados.print(temp_sonda[5]);
dados.print(", Temperatura07, ");
dados.print(temp_sonda[6]);
dados.print(", Temperatura08, ");
dados.print(temp_sonda[7]);
dados.print(", Temperatura09, ");
dados.print(temp_sonda[8]);
dados.print(", Temperatura10, ");
dados.print(temp_sonda[9]);
dados.print(", Temperatura11, ");
dados.print(temp_sonda[10]);
dados.print(", Temperatura12, ");
dados.print(temp_sonda[11]);
dados.print(", Temperatura13, ");
dados.print(temp_sonda[12]);
dados.print(", Temperatura14, ");
dados.print(temp_sonda[13]);
dados.print(", Temperatura15, ");
dados.print(temp_sonda[14]);
dados.print(", Anemometro, ");
dados.print(media08);
dados.print(", Temperatura_Ambiente, ");
dados.print(TA);
dados.print(", Umidade_Ambiente, ");
dados.print(U);

dados.print(", Radiacao, ");
dados.println(mediaSIR);
delay(100);
dados.close();
cont=0;
while ( cont<3){
digitalWrite(ledverde, HIGH);
delay(500);
digitalWrite(ledverde, LOW);
delay(200);
++cont;}}
else{
dados.close();
delay(100);
cont=0;
while ( cont<20){
//digitalWrite(ledvermelho, HIGH);
//delay(1000);
tone(buzzer,1000);
delay(100);
noTone(buzzer);
delay(100);
tone(buzzer,1500);
delay(100);
noTone(buzzer);
delay(100);
//digitalWrite(ledvermelho, LOW);
delay(500);
++cont;}
//dados.close();
delay(1000);}}

```

## Apêndice D

### Calibração dos sensores de temperatura.

Para avaliação das temperaturas os sensores de temperatura foram submetidos a um processo de calibração, a qual os mesmos foram imergidos num reservatório termicamente isolado, contendo água no seu interior. Oletou dez medidas de cada sensor em diferentes temperaturas. Com as médias, calculou-se o desvio padrão e o erro padrão através do método estatístico "t de Student", com um nível de confiança de 95% e cinco graus de liberdade ( $t_{95\%} = 2,015$ ). Onde o erro padrão é calculado pela equação 3.19. A Tabela 10 mostra as médias, os desvios padrão e os erros padrão das medidas das temperaturas neste ensaio.

Tabela 10: Média das medidas dos sensores de temperatura.

Valor de Referência	Média das medidas dos sensores de temperatura [°C]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-0,087	0,345	-0,423	-0,428	-0,365	-0,295	-0,178	-0,100	0,220	-0,045	-0,070	0,245	0,050
12,565	12,755	12,275	12,310	12,440	12,425	12,500	12,583	12,785	12,607	12,572	12,845	12,680
26,261	26,285	26,030	26,150	26,260	26,115	26,235	26,305	26,363	26,260	26,305	26,510	26,320
38,825	38,829	38,663	38,731	38,860	38,834	38,814	38,793	38,840	38,798	38,876	39,043	38,814
49,910	49,980	49,767	49,903	50,033	49,934	49,892	49,845	49,798	49,845	50,001	50,163	49,762
55,814	55,783	55,709	55,865	55,960	55,782	55,788	55,753	55,778	55,778	55,928	56,033	55,611
Desvio Padrão	0,214	0,248	0,203	0,162	0,131	0,054	0,048	0,183	0,044	0,072	0,286	0,141
Erro Padrão	0,176	0,204	0,167	0,133	0,108	0,044	0,039	0,150	0,036	0,060	0,236	0,116
Média dos Desvios Padrão =	1,785											
Média dos Erros Padrão =	0,122											

Fonte: O próprio autor, 2019.

# Apêndice E

## Curvas de tendência da eficiência dos coletores sem barreira antes da correção.

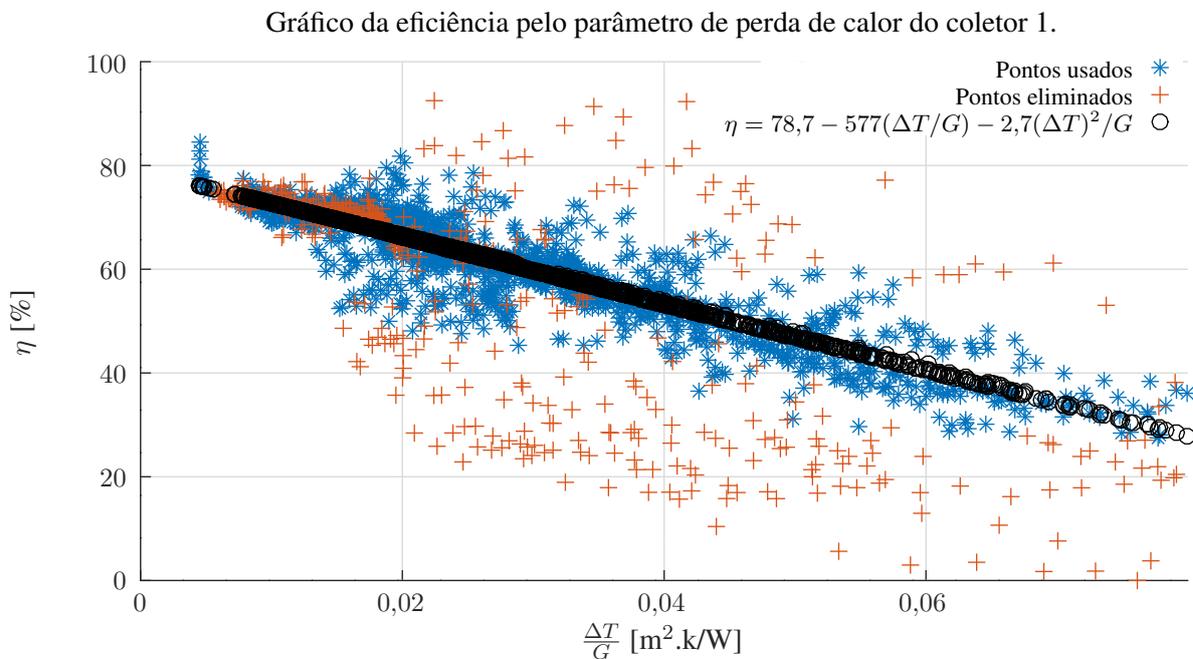


Gráfico da eficiência pelo parâmetro de perda de calor do coletor 3.

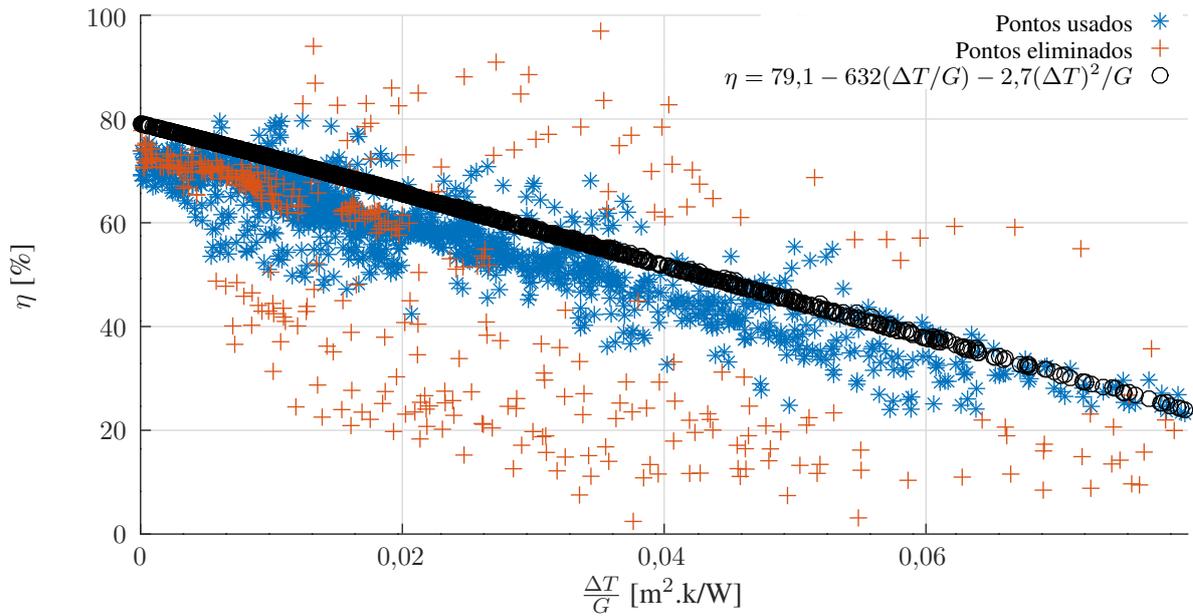


Gráfico da eficiência pelo parâmetro de perda de calor do coletor 4.

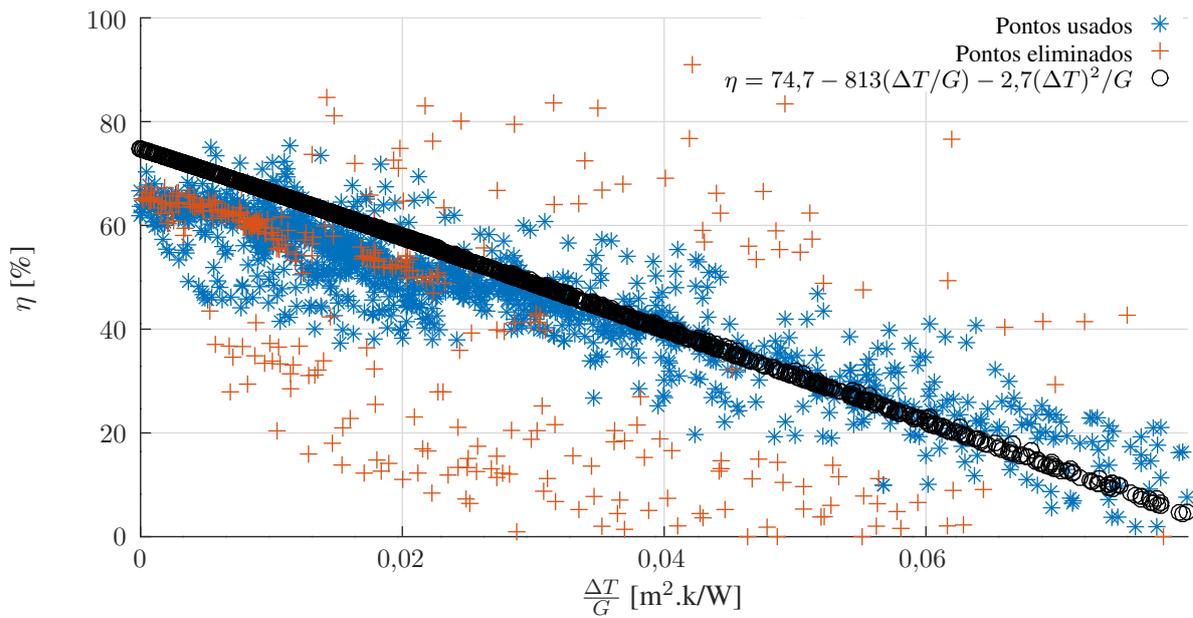
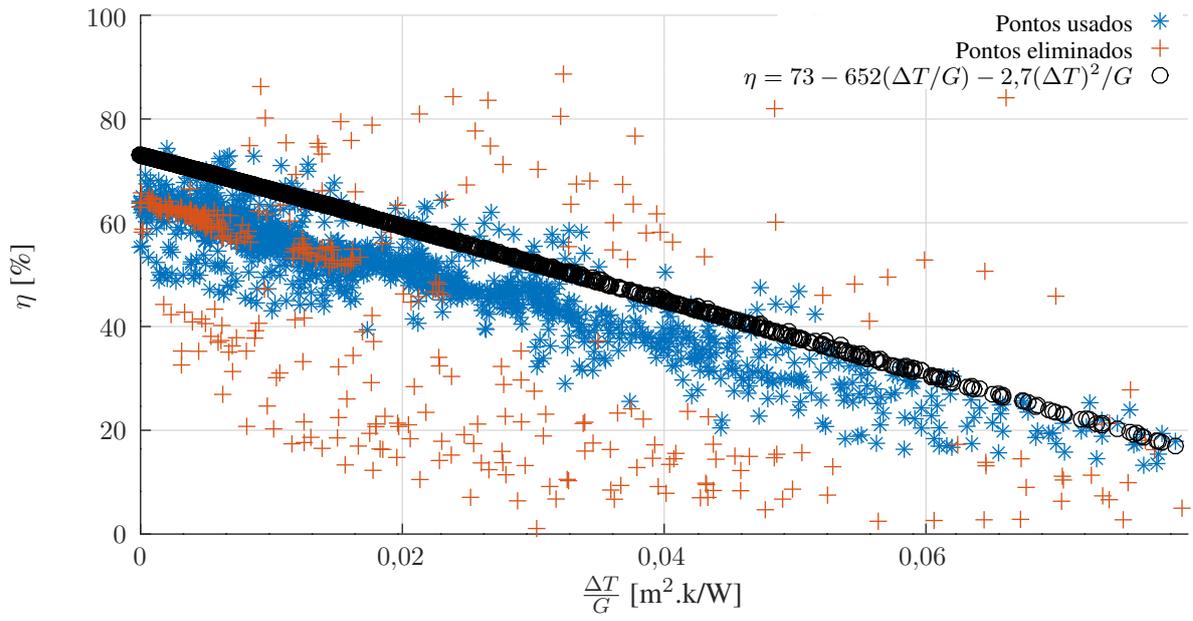


Gráfico da eficiência pelo parâmetro de perda de calor do coletor 5.



# **Anexos**

# Anexo I

## Manual da bomba d'água.

**FERRARI®**

### Certificado de Garantia:

Assegura-se a este produto garantia contra qualquer defeito de material ou de fabricação que nele se apresente no período de **1 ano**, contado a partir da data de aquisição pelo consumidor final. Os serviços de garantia a serem prestados são restritos unicamente à substituição ou conserto gratuito das peças defeituosas, desde que, a critério de um técnico credenciado, for identificado defeito de fabricação, constata-se falha em condições normais de uso, durante a vigência desta garantia.

### Para peças de desgastes Naturais como:

Selos mecânicos e Rolamentos, a garantia é assegurada **por 6 meses**, contra eventuais defeitos de material ou fabricação, comprovados por laudo técnico devidamente assinado pelo nosso Assistente Técnico Ferrari Credenciado, onde constata-se falha em condições normais de uso durante a vigência da garantia.

A garantia torna-se nula e sem efeito se este produto sofrer qualquer dano provocado por acidente, agentes da natureza, desgaste natural das peças e componentes, uso abusivo ou em desacordo com as instruções de utilização fornecidas com este produto, defeitos ou danos causados pelo descuido do usuário no manuseio, apresentar sinais de violação, ajuste ou conserto por pessoas não autorizadas ou adaptações.

A garantia não inclui consumíveis como, por exemplo, combustíveis e/ou lubrificantes. Será considerada nula a garantia se este certificado apresentar rasuras ou modificações.

Os serviços acima mencionados, somente serão prestados nos locais autorizados e indicados pela Ferrari. O proprietário se responsabiliza pelas despesas e riscos de transporte (ida e volta) do produto a esses locais. Caso não haja esse serviço em sua localidade, o proprietário se responsabiliza pelas despesas e riscos de ida do produto aos locais autorizados pela Ferrari e as despesas e riscos de transporte de volta do produto ao proprietário, é de responsabilidade da Ferrari.

O certificado, devidamente preenchido pelo revendedor, deve ser apresentado juntamente com a respectiva nota fiscal de venda em qualquer caso de reclamação.

**Nota:** A garantia torna-se nula se o equipamento for devolvido sem seus respectivos acessórios, descritos na embalagem ou no manual.

Acesse também nosso site: [www.ferrarinet.com.br](http://www.ferrarinet.com.br) e conheça toda nossa linha de produtos.

Sempre que necessário, entre em contato com a Central de Atendimento Ferrari pelo telefone:

**(11) 2105-7500.**

**Observação:** Caso não haja Serviço Autorizado em sua localidade, favor ligar para o telefone (11) 2105-7500, ou acessar o site: [www.ferrarinet.com.br](http://www.ferrarinet.com.br)

Nome do Comprador: \_\_\_\_\_

Nº. Da Nota Fiscal: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura e Carimbo do Revendedor: \_\_\_\_\_

 Comércio de Máquinas e Ferramentas Ltda.

**FERRARI®**

**Bombas d'água  
Periféricas**

**Modelos: IDB's**



**Modelo: ACQUAPUMP**



\*fotos meramente ilustrativas\*

**Parabéns,**

Você acaba de adquirir mais um produto com a qualidade Ferrari, empresa preocupada em oferecer sempre qualidade e segurança ao seus usuários.

Leia atentamente todas as instruções contidas neste manual para obter o máximo de desempenho e durabilidade do produto.

### Características Técnicas:

CÓDIGO	MODELO	TENSÃO	MOTOR	DIÂMETRO ENTRADAS/SAÍDA	DIMENSÕES DA EMBALAGEM
AAB1010003	IDB-35	127/220V	1/4 cv	1"	233 x 156 x 175 mm
AAB1010004	IDB-35	127/220V	1/3 cv	1"	233 x 156 x 175 mm
AAB1010005	BA-40	127/220V	1/2 cv	1"	233 x 156 x 175 mm
AAB1010001	IDB-40	127/220V	1/2 cv	1"	233 x 156 x 175 mm
AAB1010002	IDB-50	127/220V	1 cv	1.1/2"	345 x 185 x 235 mm
AAB1010009	IDB-40 - PREMIUM	127/220V	1/2 cv	1"	280 x 135 x 175 mm
AAB1010010	IDB-50 - PREMIUM	127/220V	1 cv	1"	310 x 170 x 210 mm

**OBS.: VAZÃO ESPECIFICADA PARA SUÇÇÃO E RECALQUE ZERO.  
TEMPERATURA MÁX. DO LÍQUIDO 40°C.**

Conservar este Manual - novembro de 2016



## Anexo II

# Relatório de ensaio do coletor solar "Tropicos Omega V 200".

IPT/11117



IPT/11117 1/4



Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento / CETAC / IPT

### RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 1 086 807-203

**CLIENTE:** Solis Indústria e Comércio de Aquecedor Solar LTDA - EPP.  
CNPJ: 97.546.724/0001-77  
R. Santa Cecília, nº 475, Patrimônio Santo Antônio, Birigui-SP  
CEP: 16200-800

**A/C:** Sr. Luiz Antonio

**INTERESSADO:** Instituto de Tecnologia MHC.

**NATUREZA DO TRABALHO:** Ensaio de coletor solar para aquecimento de água de acordo com Regulamento Técnico da Qualidade de Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água aprovado pela Portaria nº 301 de 14/06/2012 do INMETRO.

**REFERÊNCIA:** Orçamento nº 8224/16. Processo da OCP nº IT 111-3.

#### 1 ITEM / MATERIAL

Tabela 1 – Descrição do item.

Amostra	Descrição do Fabricante	
1228-16	Modelo	TRÓPICOS OMEGA V 200
	Data de recebimento	30/06/2016
	Material da caixa externa	Alumínio
	Tipo e espessura da cobertura do coletor	Vidro liso 3 mm
	Material do absorvedor	Alumínio
	Pintura/tratamento da superfície do absorvedor	Pintura comercial preto fosco
	Quantidade e material dos tubos no absorvedor	8 tubos de cobre
	Material e espessura do isolamento da base	10 mm de Lã de PET
	Material e espessura do isolamento da lateral	Não se aplica
	Largura externa declarada	1000 mm
	Comprimento externo declarado	2000 mm
	Espessura externa declarada	65 mm
	Área externa declarada	2,000 m <sup>2</sup>
	Área transparente declarada	1,923 m <sup>2</sup>

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento / CETAC / IPT  
Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob o número CRL 0111



Figura 1 – Foto do item.

## 2 MÉTODOS UTILIZADOS

Tabela 2 – Lista dos procedimentos.

Procedimento	Título
CETAC-LIP-PE-110	Inspeção Inicial
CETAC-LIP-PE-100	Coletor Solar Fechado – Desempenho térmico com uso de simulador solar

A norma, em sua revisão mais recente, de referência para os procedimentos é o Regulamento Técnico da Qualidade de Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água aprovado pela Portaria nº 301 de 14/06/2012 do INMETRO.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Inspeção inicial

Tabela 3 – Resultados da inspeção inicial.

Número da Amostra	Grandeza	Valores	
		Declarado	Medido
1228-16	Área transparente (m <sup>2</sup> )	1,923	1,923
	Área externa (m <sup>2</sup> )	2,000	2,000

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento / CETAC / IPT  
Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob o número CRL 0111

### 3.2 Desempenho térmico

O método de ensaio seguiu o item 6.1 da ABNT NBR 15747-2. Os resultados dos coeficientes de desempenho (em relação à área transparente) são apresentados na Tabela 4. A curva de eficiência é apresentada no Gráfico 1.

Tabela 4 – Coeficientes da curva de eficiência.

Número da Amostra	Coefficiente	Unidade	Valor
1228-16	$\eta_{0a}$	Adimensional	0,763
	$a_{1a}$	$W / m^2 \times ^\circ C$	6,056
	$a_{2a}$	$W / m^2 \times ^\circ C^2$	0,027

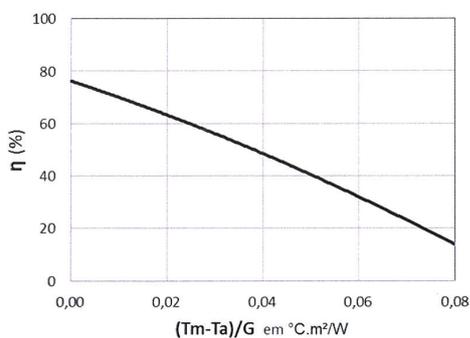


Gráfico 1 – Curva de eficiência em relação à área transparente.

A tabela a seguir mostra os parâmetros do INMETRO para o coletor, no caso de aplicação banho, de acordo com Regulamento da Portaria nº 301/12 do INMETRO.

Tabela 5 – Índices do INMETRO para o coletor considerando aplicação banho.

$\eta$ médio (%)	PME (kWh/mês)	PMEe (kWh/mês.m <sup>2</sup> )	Classificação
61,64	171,4	85,7	A

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.



Relatório de Ensaio nº 1 086 807-203 - 4/4

Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento / CETAC / IPT  
 Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob o número CRL 0111

#### 4 LIMITES ESPECIFICADOS

Tabela 6 – Limites especificados.

Ensaio	Aplicação	Critério
Inspeção Inicial	-	Valores medidos de acordo com os declarados
Desempenho térmico	Banho	PMEe > 52,3 kWh/m <sup>2</sup> .mês

De acordo com a Portaria nº 118 de 06/03/2015 do INMETRO, os resultados devem ser analisados pelo solicitante (OCP).

#### 5 ANEXOS

ANEXO A – Incertezas dos ensaios.....1 pág.

ANEXO B – Condições iniciais da amostra.....1 pág.

#### EQUIPE TÉCNICA

Engenheiro Civil Dr. Daniel Setrak Sowmy – IPT  
 Engenheiro Civil Mestre Paulo José Schiavon Ara – IPT  
 Engenheira Civil Karen Gonzaga – FIPT  
 Tecn.<sup>9º</sup> Sistema Elétricos Flávio da Silva Ladeira – IPT  
 Secretária – Melissa Revoredo – FIPT

São Paulo, 15 de dezembro de 2016.

CENTRO TECNOLÓGICO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO  
 Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento

Eng<sup>o</sup> Civil Mestre Paulo José Schiavon Ara  
 Pesquisador  
 CREA nº 5082468101 - RE nº 8841

CENTRO TECNOLÓGICO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO  
 Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento

Eng<sup>o</sup> Civil Dr. Daniel Setrak Sowmy  
 Chefe do Laboratório  
 CREA nº 5081523918 – RE nº 8504

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
 São Paulo | SP | 05508-901  
 Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)



Anexo A do Relatório de Ensaio nº 1 086 807-203 - 1/1

Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento / CETAC / IPT  
Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob o número CRL 0111

**ANEXO A – Incertezas dos ensaios**

Ensaio	Mensurando	Unidade	Incerteza padrão combinada
Inspeção Inicial	Área	m <sup>2</sup>	0,04
Desempenho Térmico	Eficiência térmica	%	0,6

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento / CETAC / IPT  
Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob o número CRL 0111

### ANEXO B – Condições iniciais da amostra



Figura B1 – Foto do laque da OCP.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.



## Anexo III

# Datasheet do sensor de temperatura (Dallas-DS18B20)

**PRELIMINARY**

**DS18B20**  
Programmable Resolution  
1-Wire® Digital Thermometer

**DALLAS SEMICONDUCTOR**

[www.dalsemi.com](http://www.dalsemi.com)

**FEATURES**

- Unique 1-Wire interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line. Power supply range is 3.0V to 5.5V
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to +125°C. Fahrenheit equivalent is -67°F to +257°F
- ±0.5°C accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer resolution is programmable from 9 to 12 bits
- Converts 12-bit temperature to digital word in 750 ms (max.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

**PIN ASSIGNMENT**

**BOTTOM VIEW**

DS18B20 To-92 Package

DS18B20Z  
8-Pin SOIC (150 mil)

**PIN DESCRIPTION**

GND - Ground  
DQ - Data In/Out  
V<sub>DD</sub> - Power Supply Voltage  
NC - No Connect

### DESCRIPTION

The DS18B20 Digital Thermometer provides 9 to 12-bit (configurable) temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS18B20 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS18B20. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS18B20 contains a unique silicon serial number, multiple DS18B20s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and process monitoring and control.