

# **Universidade Estadual de Maringá**



**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**VICTOR CESAR PANUCI**

**Análise teórica, numérica e experimental de um coletor solar de placas planas destinado ao aquecimento de ar**

VICTOR CESAR PANUCI

**Análise teórica, numérica e experimental de um coletor solar de placas planas destinado ao aquecimento de ar**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas.

Orientador: Prof. Dr. Wagner A. Dos Santos Conceição

Coorientadora: Profa. Dra. Mônica Ronobo Coutinho

**Maringá**

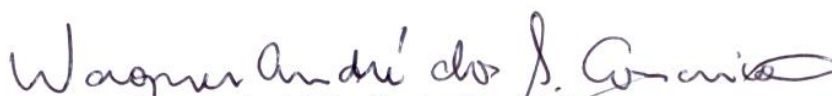
**2017**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)**

P198a Panuci, Victor Cesar  
Análise teórica, numérica e experimental de um coletor solar de placas planas destinado ao aquecimento de ar / Victor Cesar Panuci. -- Maringá, 2017.  
84 f. : il. color., figs., tabs.  
  
Orientador: Prof. Dr. Wagner A. dos Santos Conceição.  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mônica Ronobo Coutinho.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.  
  
1. Coletor solar. 2. Placas planas. 3. Elmer (Software) - Simulação numérica. I. Conceição, Wagner André dos Santos, orient. II. Coutinho, Mônica Ronobo, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Exatas. Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.  
  
CDD 23.ed. 621.472

Este é o exemplar definitivo da Dissertação apresentada por **Victor Cesar Panuci**, perante a Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica em 31 de outubro de 2017.

### COMISSÃO JULGADORA

  
Wagner André dos Santos Conceição  
Presidente – DEM/UEM

  
Júlio César Dainezi de Oliveira  
Membro – DEM/UEM

  
Juliana Guerra Sgorlon  
Membro – UTFPR/Apucarana – PR.

Aos meus pais, Ademir e Luzia.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, e acima de tudo, agradeço a Deus,  
o Autor da vida e fonte de toda sabedoria e inteligência, por ter me capacitado e permitido a conclusão desta dissertação.

Ao professor Wagner e professora Mônica,  
pela orientação exemplar, dedicação e paciência, necessárias para a concretização deste trabalho.

Aos meus pais,  
por oferecerem suporte às escolhas que fiz durante minha vida.

Aos meus amigos: Alisson, Caio, Cássio, Flávio e Vinícius,  
pelos momentos de alegria compartilhados antes e durante este período.

Aos professores da Universidade Estadual de Maringá,  
por me proporcionarem uma formação sólida.

Ao Departamento de Geografia,  
por permitir a realização de experimentos na Estação Climatológica de Maringá.

Ao engenheiro mecânico Reinaldo,  
por me incentivar a utilizar *softwares* livres.

Ao geógrafo Kleber Souza,  
por sua atenção e conselhos.

“As invenções são, sobretudo,  
o resultado de um trabalho teimoso.” (Santos Dumont)

## RESUMO

Os coletores solares são utilizados para aquecer o ar, sendo uma forma de converter a energia de radiação solar, disponível de forma gratuita, limpa e sustentável, em uma energia térmica passível de ser aproveitada pelas mais diversas atividades humanas. O ar é admitido em temperatura ambiente pelo coletor e escoado em seu interior absorvendo calor das placas que constituem o conjunto, o que causa um incremento em sua temperatura. O ar quente pode, então, ser utilizado em desidratadores de alimentos, trocadores de calor, estufas, entre outras aplicações. Este trabalho teve como objetivo analisar aquecedores solares de placas planas de canal simples com convecção forçada, identificando a relação entre a vazão mássica de ar e a eficiência. Para isso, foram utilizadas três abordagens distintas, com a intenção de comparar a eficácia dos métodos e validar os resultados. As abordagens são a modelagem analítica proposta por Ong (1995); a simulação utilizando o pacote de elementos finitos Elmer disponível como *software* de licença livre; e a aquisição de dados de um protótipo experimental. Inicialmente, foi utilizado o modelo analítico implementado no *software* livre Scilab para obter a geometria mais adequada às condições climáticas da região e selecionar materiais de baixo custo. Em seguida, essa geometria foi modelada e o processo simulado utilizando o Elmer. Para finalizar, o protótipo foi construído para a coleta de dados. Foi possível confirmar a validade dos dados coletados experimentalmente com os resultados obtidos analiticamente e numericamente. Além disso, coletores submetidos a um escoamento forçado possuem um comprimento ideal de projeto, o qual pode ser previsto para evitar uma região de menor eficiência.

Palavras-chave: Coletor solar. Placas planas. Simulação numérica. Elmer.



## **ABSTRACT**

The solar collectors are used to heat the air, being a way to convert solar energy radiation, available free of charge, clean and sustainable, in a thermal energy that can be used by the most diverse human activities. The air is admitted in room temperature by the collector and drains inside absorbing heat from the plates that make up the set, which causes an increase in its temperature. Hot air can be used in food dehydrators, heat exchangers, greenhouses, among other applications. The objective of this work was to analyze solar heaters of flat plates of single channel with forced convection, identifying the relation between the mass flow of air and the efficiency. Three different approaches were used to compare the efficacy of the methods and to validate the results. The approaches are the analytical modeling proposed by Ong (1995), the simulation using the Elmer finite element package available as free license software and data acquisition from an experimental prototype. Initially, the analytical model implemented in the free software Scilab was used to obtain the geometry best suited to the climatic conditions of the region and to select low cost materials. Then, this geometry was modeled and the process simulated using Elmer. Finally, the prototype was built for data collection. It was possible to confirm the validity of the data collected experimentally with the results obtained analytically and numerically. In addition, collectors subjected to a forced flow have an ideal design length which can be predicted to avoid a region of lower efficiency.

**Keywords:** Solar collector. Flat plates. Numerical simulation. Elmer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Média anual de irradiação solar no Brasil.....	21
Figura 2 – Coletor de passe simples superior.....	22
Figura 3 – Coletor de passe simples inferior.....	23
Figura 4 – Coletor solar de passe duplo.....	23
Figura 5 – Processos de transferência de calor em um coletor de canal simples.....	25
Figura 6 – Volume de controle diferencial ao longo do fluxo de escoamento.....	27
Figura 7 – Plataforma Arduino modelo UNO.....	36
Figura 8 – Tipos de sinais: (a) analógico; (b) digital.....	37
Figura 9 – Sensor LM-35 e seu esquema de pinos.....	38
Figura 10 – Erro de medida LM-35.....	38
Figura 11 – Seção transversal do coletor solar.....	40
Figura 12 – Modelo renderizado do coletor solar.....	41
Figura 13 – Lógica do sistema de aquisição de dados.....	43
Figura 14 – Disposição dos sensores de temperatura.....	44
Figura 15 – Primeira etapa experimental.....	45
Figura 16 – Segunda etapa de aquisição de dados.....	46
Figura 17 – Ventilador centrífugo Apollo-12.....	47
Figura 18 – Circuito <i>PWM</i> utilizado.....	48
Figura 19 – Anemômetro AD-250.....	49
Figura 20 – Saída de ar do coletor solar.....	49
Figura 21 – Piranômetro à esquerda e pluviômetro à direita utilizados na estação climatológica.....	50
Figura 22 – Dimensão de cada porção do domínio.....	51
Figura 23 – Domínio utilizado para modelar o coletor.....	52
Figura 24 – Malha de elementos triangulares lineares.....	52
Figura 25 – Linhas de análise de resultado para experimento em residência.....	56
Figura 26 – Linhas de análise de resultado para experimento em estação meteorológica.....	57
Figura 27 – Distribuição de temperatura no coletor solar em 02/01/2017-15 UTC.....	68
Figura 28 – Distribuição de temperatura no coletor solar em 05/08/2017-15 UTC.....	70
Gráfico 1 – Perfil de temperatura para condições ideais.....	59
Gráfico 2 – Irradiação solar no dia 02/01/2017.....	60
Gráfico 3 – Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 02/01/2017.....	61

Gráfico 4 – Irradiação solar no dia 03/01/2017.....	62
Gráfico 5 – Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 03/01/2017.....	63
Gráfico 6 – Irradiação solar no dia 05/08/2017.....	64
Gráfico 7 – Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 05/08/2017.....	65
Gráfico 8- Irradiação solar no dia 06/08/2017.....	66
Gráfico 9 - Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 06/08/2017.....	66
Gráfico 10 - Dados experimentais e simulados para o dia 02/01/2017.....	67
Gráfico 11 – Perfil de temperatura: 15 UTC – 02/01/2017.....	69
Gráfico 12 – Dados experimentais e simulados para o dia 05/08/2017. ....	70
Gráfico 13 – Perfil de temperatura: 15 UTC – 05/08/2017.....	71
Gráfico 14 – Influência da vazão de ar na temperatura de saída do ar.....	72
Gráfico 15 – Influência da vazão de ar na eficiência global do coletor solar.....	73
Gráfico 16 – Perfil de temperatura do ar ao longo do comprimento do coletor.....	74
Gráfico 17 – Curvas de eficiência pontual. ....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais elementos do coletor solar. ....	40
Tabela 2 – Parâmetros do coletor. ....	41
Tabela 3 – Códigos ASCII. ....	42
Tabela 4 – Posição dos sensores na primeira etapa. ....	44
Tabela 5 – Posição dos sensores no segundo experimento. ....	46
Tabela 6 – Especificações do anemômetro utilizado.....	48
Tabela 7 – Propriedade dos materiais.....	53
Tabela 8 – Condições de contorno do modelo proposto. ....	54
Tabela 9 – Posição de extração dos resultados no primeiro experimento. ....	56
Tabela 10 – Posição de extração dos resultados no segundo experimento. ....	57
Tabela 11 – Parâmetros da análise de eficiência. ....	58
Tabela 12 – Velocidade de ar no canal do coletor solar.....	59
Tabela 13 – Dados climatológicos 02/01/2017. ....	60
Tabela 14 – Dados climatológicos 03/01/2017. ....	62
Tabela 15 – Dados climatológicos 05/08/2017. ....	64
Tabela 16 – Dados climatológicos 06/08/2017. ....	65
Tabela 17 - Comprimentos ideais de acordo com a vazão de ar. ....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS

$T$	Temperatura
$T_0$	Temperatura no estado de referência
$T_a$	Temperatura da vizinhança
$T_1$	Temperatura da placa superior
$T_2$	Temperatura da placa inferior
$T_f$	Temperatura do fluido de trabalho
$T_{f,i}$	Temperatura de entrada do fluido de trabalho
$T_{f,o}$	Temperatura de saída do fluido de trabalho
$T_{f,k}$	Temperatura do fluido em uma porção do coletor
$T_{1,k}$	Temperatura da placa superior em uma porção do coletor
$T_{2,k}$	Temperatura da placa inferior em uma porção do coletor
$q, Q$	Fluxo de calor
$C, c_p$	Calor específico
$k$	Condutividade térmica
$h, \alpha$	Coeficiente convectivo
$h_1$	Coeficiente convectivo entre a placa superior e o fluido de trabalho
$h_2$	Coeficiente convectivo entre a placa inferior e o fluido de trabalho
$h_w$	Coeficiente convectivo entre a placa superior e a vizinhança
$h_{r21}$	Coeficiente de radiação entre as superfícies inferior e superior
$h_s$	Coeficiente de radiação entre a superfície superior e o céu
$L$	Comprimento do coletor solar
$L_k$	Comprimento de uma porção do coletor solar
$\dot{m}$	Vazão mássica
$\eta$	Eficiência
$\eta_k$	Eficiência de uma porção do coletor
$S_1$	Fluxo de irradiação solar absorvida na superfície superior
$S_2$	Fluxo de irradiação solar absorvida na superfície inferior
$U_b$	Coeficiente global de perda de calor inferior
$U_t$	Coeficiente global de perda de calor superior
$W$	Profundidade do coletor solar
$\phi$	Latitude
$V_s$	Tensão de entrada

$V_o$	Tensão de saída
$u$	Campo de velocidade
$p$	Pressão
$\rho$	Densidade
$\rho_0$	Densidade no estado de referência
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman
$\varepsilon$	Emissividade
$R$	Constante dos gases ideais
$\gamma$	Razão de calores específicos
$c$	Velocidade do som
$\beta$	Coeficiente de expansão de volume
$V(i)$	Diferença de potencial no sensor com posição indicado pelo índice
$I$	Intensidade de irradiação solar
$\bar{\tau}$	Tensor de tensão
$\bar{\varepsilon}$	Taxa de deformação
$G_{ij}$	Fator de forma entre duas superfícies quaisquer
$A_j$	Área de uma superfície qualquer
$e, \epsilon$	Erro numérico
$\partial T$	Diferencial de temperatura
$\partial \vec{u}$	Diferencial do campo vetorial de velocidade
$\partial \rho$	Diferencial da densidade
$\partial t$	Diferencial do tempo
$\partial y, \partial n$	Diferencial de comprimento

## ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação de Normas Técnicas
ADC	Conversor Analógico Digital – <i>Analog Digital Converter</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climáticos
DMA	Divisão de Clima e Meio Ambiente
EPS	Poliestireno expansível
MEF	Método dos Elementos Finitos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
UEM	Universidade Estadual de Maringá
USB	Porta Serial Universal – <i>Universal Serial Bus</i>
AREF	Analógico de Referência
PID	Proporcional Integral e Derivativo
GND	Filtro Graduado de Densidade Neutra – <i>Graduated Neutral Density Filter</i>
CFD	Fluido Dinâmica Computacional – <i>Computational Fluid Dynamics</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso – <i>Pulse Width Modulation</i>
DDP	Diferença de Potencial
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
UTC	Tempo Universal Coordenado – <i>Universal Time Coordinated</i>
CSC	Centro de Ciência – Center For Science
ASCII	Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação – <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
Temp.	Temperatura
Simul.	Simulação
Vel.	Velocidade
Irrad.	Irradiação
Raj.	Rajada
Mín.	Mínimo (a)
Máx.	Máximo (a)
n.a.	Não aplicável
un.	Unidade
aprox.	Aproximadamente

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1	Desidratação de alimentos .....	19
2.2	Energia solar .....	19
2.2.1	Radiação solar no Brasil .....	20
2.3	Coletores solares .....	22
2.4	Análise energética .....	24
2.4.1	Modelagem matemática .....	25
2.4.2	Algoritmo para solução .....	29
2.5	Simulação computacional .....	30
2.5.1	Pacote de elementos finitos Elmer CSC .....	30
2.5.2	Equacionamento .....	31
2.6	Aquisição e monitoramento de dados .....	35
2.6.1	Plataforma Arduino .....	36
2.6.2	Sensores de temperatura .....	37
2.6.3	Software numérico Scilab .....	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	40
3.1	Dimensionamento .....	41
3.2	Aquisição de dados .....	42
3.2.1	Aquisição de temperatura realizada em área residencial .....	44
3.2.2	Aquisição de temperatura realizada em estação climatológica .....	45
3.2.3	Vazão de ar .....	47
3.2.4	Condições climáticas .....	49
3.3	Modelo computacional .....	51
3.3.1	Pré-processamento .....	51



3.3.2	Processamento .....	55
3.3.3	Pós-processamento .....	55
3.4	Análise da influência da vazão de ar na eficiência .....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
4.1	Vazão experimental .....	59
4.2	Operação para área residencial .....	60
4.3	Operação em estação meteorológica.....	63
4.4	Validação do modelo computacional.....	67
4.5	Eficiência térmica e otimização da geometria .....	72
4.5.1	Relação entre vazão e eficiência.....	72
4.5.2	Comprimento ideal .....	73
5	CONCLUSÕES .....	76
	REFERÊNCIAS.....	77
	APÊNDICE A – Gráficos de resultados simulados e experimentais .....	81

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de tecnologias sustentáveis é cada vez mais necessária para as atividades humanas. Esta busca é impulsionada pela alta dos preços dos combustíveis fósseis e pela preocupação ambiental.

A energia solar é proveniente de uma fonte natural de radiação, limpa e gratuita. Esta forma de energia pode ser utilizada de forma direta como fonte de energia térmica em sistemas aquecedores de ar ou água e para geração de potência mecânica ou elétrica.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito por meio do uso de coletores ou concentradores solares. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “entre os vários processos de aproveitamento de energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, o primeiro é o mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido às características climáticas”. (ANEEL, 2002, p. 05)

Os coletores solares são aparatos com a função de absorver a energia da radiação oriunda do Sol e transferi-la para o fluido de trabalho em forma de calor, provocando seu aquecimento. Existem diversos tipos construtivos que podem ser diferenciados por sua geometria ou fluido de trabalho.

Os coletores de ar de placas planas e paralelas são basicamente formados por uma superfície escura responsável por absorver a energia de radiação; uma superfície de cobertura responsável por evitar a perda de calor entre o coletor e o ambiente externo, ao mesmo tempo em que permite a passagem da radiação solar; duas superfícies laterais que, em conjunto com as anteriores, formam o duto condutor do fluido; e uma estrutura metálica ou de madeira que sustenta o conjunto em uma inclinação definida.

O ar quente oriundo deste coletor pode ser aplicado para vários fins, como em desidratadores de alimentos, secadores de matéria-prima, trocadores de calor, entre outros, qualificando-se, então, como uma forma de utilizar a energia solar em substituição a outras fontes mais caras e poluentes.

Nesta perspectiva, os objetivos desta dissertação são: dimensionar um coletor solar de placas planas; construí-lo utilizando materiais acessíveis; elaborar um sistema de aquisição de temperatura e analisar o comportamento deste coletor utilizando três abordagens distintas. As abordagens são a modelagem analítica proposta por Ong (1995); a simulação utilizando o pacote de elementos finitos Elmer disponível como *software* de licença livre; e a aquisição de

dados de um protótipo experimental, buscando identificar a influência da vazão de ar na eficiência do coletor.

Sendo assim, esta análise será de grande relevância no projeto de coletores mais eficientes, já que permitirá uma comparação entre dados teóricos e práticos relacionando características do fluxo ao gradiente de temperatura do fluido.

Além disso, o Brasil possui um potencial energético solar que pode ser explorado. Há boa uniformidade na média anual de irradiação sendo relativamente alta e o desenvolvimento de um coletor solar de baixo custo pode ser realizado por pequenos produtores rurais na desidratação de alimentos, gerando uma fonte de renda. O desenvolvimento de um método de aquisição de dados utilizando *hardware* e *software* livre pode ser aplicado nos mais diversos setores da indústria. Já a validação do módulo de equações térmicas do *software* Elmer nos permite usá-lo com confiança para vários fins, enquanto que a simulação numérica permite identificar pontos de melhoria de eficiência no coletor com maior precisão e confiabilidade, mesmo para geometrias que se tornam complexas para a análise teórica. Por fim, o estudo mostra-se inovador nesta área ao ser realizado integralmente com *softwares* livres.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os coletores solares de placas planas possuem diversos tipos construtivos diferentes de acordo com a sua aplicação. Neste capítulo são apresentadas a aplicação deste equipamento para a desidratação de alimentos, a modelagem matemática desenvolvida por Ong (1995), as equações do modelo em elementos finitos proposto e as características dos principais constituintes do sistema de monitoramento de temperatura desenvolvido.

### **2.1 Desidratação de alimentos**

Budea (2014) destaca duas aplicações para o coletor solar: ao mesmo tempo em que esse equipamento pode ser usado para aquecer o ar em estações de temperaturas baixas, ele pode ser utilizado no verão para evacuar o ar quente e poluído de residências, escritórios e construções comerciais ou industriais.

Machado (2011) estudou e demonstrou a viabilidade da utilização de coletores solares na secagem do pedúnculo de caju. Segundo o autor, esse produto é desperdiçado em cerca de 94% de sua produção, pois a grande dificuldade dos fruticultores é a sua conservação. Seu objetivo foi estudar a secagem do pedúnculo de caju em um secador solar sob convecção forçada.

O autor concluiu que a secagem obteve um produto de boa qualidade. A velocidade do ar de secagem e a espessura das fatias de caju são parâmetros importantes no tempo necessário para a secagem. Além disso, o método é eficiente e agrega valor ao produto, sendo uma alternativa para aumentar a renda familiar dos produtores do Nordeste do Brasil.

Segundo Madamba (2007), um dos processos mais utilizados para a conservação de produtos alimentícios e agropecuários é a sua desidratação, já que esta mantém suas propriedades biológicas e nutricionais.

Com a desidratação também é possível conseguir um produto nutritivo e o sabor inalterado por um longo período de tempo, pois a redução de água, além de provocar a concentração de nutrientes, evita a sua degradação biológica (CELESTINO, 2010).

### **2.2 Energia solar**

Devido à inclinação do eixo imaginário de rotação terrestre e à trajetória da elíptica que a Terra descreve em torno do Sol, a disponibilidade de radiação solar depende da latitude local e da posição no tempo.

Segundo a ANEEL (2002, p.07),

[...] para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição do coletor ou painel solar de acordo com a latitude local e o período do ano em que se requer mais energia. No hemisfério Sul, por exemplo, um sistema de captação solar fixo deve ser orientado para o norte, com ângulo de inclinação similar ao da latitude local.

Os fatores climáticos também interferem na disponibilidade de energia solar. De acordo com Pereira et al. (2006, p.14), “ao atravessar a atmosfera, a radiação é atenuada por processos físicos de espalhamento e absorção com os constituintes atmosféricos e a superfície do planeta”.

Para estimar o fluxo de radiação, é possível utilizar modelos que utilizam parametrizações baseadas em dados coletados na superfície ou por satélites. Esses modelos são classificados em estatísticos ou físicos. Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas e geralmente apresentam validade apenas na região de estudo e coleta dos dados. Já os modelos físicos resolvem a equação de transferência radiativa, sendo válidos para qualquer região do globo. Entretanto, a dificuldade da aplicação reside no fato de parametrizar corretamente as interações entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos.

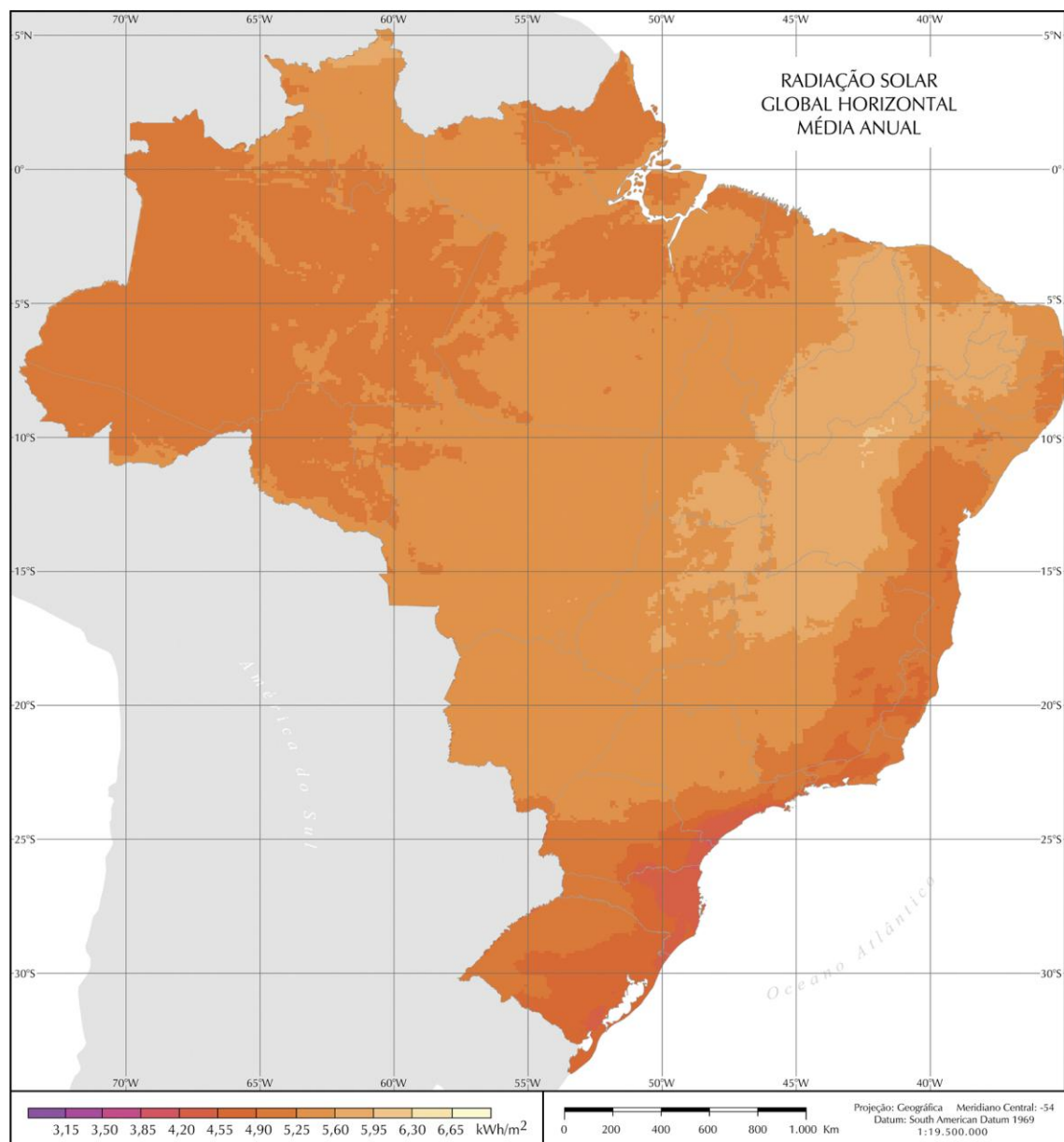
### *2.2.1 Radiação solar no Brasil*

O modelo BRASIL–SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina o uso de dados de informações climatológicas e parâmetros determinados a partir de imagens de satélite na solução da Equação de transferência radiativa. Foram considerados fatores climatológicos como: temperatura e visibilidade, albedo de superfície, umidade relativa do ar, altitude, entre outros.

O modelo foi utilizado para mapear o fluxo de radiação solar no Brasil disponível no Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido pelos órgãos: Divisão de Clima e Meio Ambiente (DMA); Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climáticos (CPTEC); Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); e Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT).

Os mapas apresentam os valores médios das estimativas do total diário de irradiação solar. Há uma biblioteca de dados confiáveis de todo o território nacional com valores sazonais para radiação horizontal, radiação em plano inclinado e radiação difusa. A média de irradiação solar total diária estimada durante um ano no Brasil está representada na Figura 1.

Figura 1 – Média anual de irradiação solar no Brasil.



Fonte: PEREIRA et al., 2006.

O modelo demonstrou o potencial energético solar que o Brasil possui para ser explorado. Há uma boa uniformidade na média anual de irradiação em todo país e esta é relativamente alta. O valor máximo de irradiação global é 6,5 kWh/m<sup>2</sup>, no norte do estado da Bahia, fronteira com o estado do Piauí. Por sua vez, o valor mínimo é 3,50 kWh/m<sup>2</sup> e ocorre

no litoral norte do estado de Santa Catarina. Esses valores são superiores aos da maioria dos países da União Europeia.

### 2.3 Coletores solares

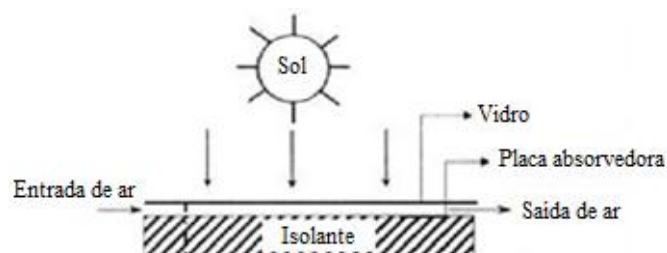
Segundo Zilles (1987), o coletor solar permite transformar a energia eletromagnética proveniente do sol em energia térmica. A superfície absorvedora escura absorve a energia solar incidente e tem sua temperatura aumentada. Já a superfície de vidro, acima da anterior, reduz as perdas por convecção e radiação para a atmosfera, além de formar um canal condutor para o fluido de trabalho.

O coletor solar de placas planas é um dos projetos mais comuns deste tipo de equipamento. O sistema é basicamente uma caixa de metal que possui um vidro ou um plástico de cobertura na parte superior e uma placa absorvedora na inferior. Diferentes materiais podem ser utilizados para a placa absorvedora, como cobre, alumínio e aço. Um isolante é utilizado atrás do coletor para minimizar as perdas de calor. O isolante deve ser selecionado de maneira que não funda ou encolha em temperaturas até 200 °C. Além disso, o coletor é aplicável na faixa de temperaturas entre a temperatura ambiente e 60 a 100 °C (KARIM et al., 2015).

A ideia do sistema é que o ar que entra no coletor aqueça ao longo deste com o calor fornecido pela placa absorvedora. A função desta placa é absorver a energia de radiação oriunda do Sol. Os coletores solares de placas planas podem ser projetados de diferentes formas, incluindo um único passe de fluido, que pode ser acima ou abaixo da placa de absorção ou escoamento em passe duplo (KARIM et al., 2015).

O escoamento em passe simples acima da placa de absorção está ilustrado na Figura 2. A eficiência deste caso é baixa, pois o contato do ar com o vidro provoca grandes perdas de energia para o ambiente.

Figura 2 – Coletor de passe simples superior.

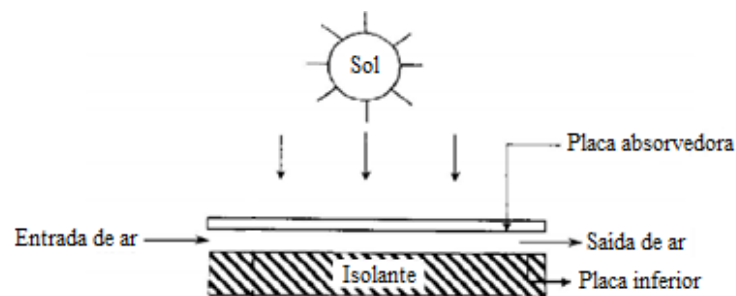


Fonte: Adaptado de KARIM et al., 2015.

A vantagem deste tipo construtivo é possuir fabricação simples e barata. O uso de uma dupla camada de vidro pode ser adotado, entretanto, isso reduz a incidência de irradiação solar.

Outra configuração comum está ilustrada na Figura 3, na qual o escoamento de fluido ocorre abaixo da placa absorvedora. Uma placa isolante é necessária para formar o canal de escoamento.

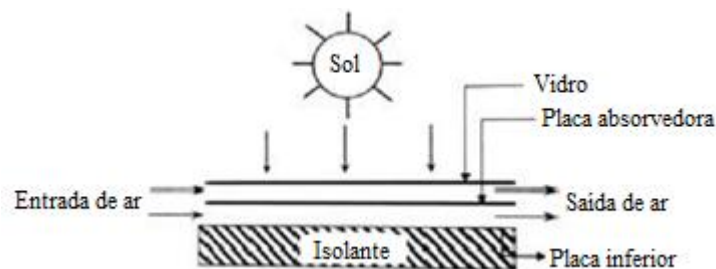
Figura 3 – Coletor de passe simples inferior.



Fonte: Adaptado de KARIM et al., 2015.

Já na configuração com passe duplo, como mostrado na Figura 4, o ar flui em ambos os lados da placa absorvedora.

Figura 4 – Coletor solar de passe duplo.



Fonte: Adaptado de KARIM et al., 2015.

De acordo com Karim et al. (2015), a vantagem deste sistema está no fato de que há o dobro de área de contato efetivo em relação aos tipos construtivos anteriores.

Zilles (1987) realizou um estudo experimental com coletores solares planos, comparando sua eficiência térmica em regime quase permanente utilizando simuladores solares e a radiação solar, a fim de correlacionar os dois experimentos e determinar seus parâmetros técnicos. Os simuladores estudados fornecem meio para determinar esses



parâmetros por intermédio do uso de uma fonte artificial de irradiação, sem depender, então, de condições climáticas adversas para realizar testes de eficiência térmica.

Budea (2017) disserta que os testes com fonte natural são mais difíceis de executar em condições climáticas desfavoráveis, porém fornecem resultados mais precisos da operação do coletor. Sendo assim, seu objetivo foi validar os testes com simulador de irradiação e encontrar parâmetros para correlacionar os dois sistemas.

O autor desenvolveu um procedimento computacional de análise de coletores solares que foi comparado com os resultados experimentais de um coletor comercial utilizado no clima do sudeste europeu. O estudo analisa a eficiência na conversão de energia de irradiação em energia térmica verificando sua dependência com os materiais utilizados, com a geometria utilizada na fabricação do coletor (forma do canal de escoamento, rugosidade e turbulência do escoamento), irradiância solar global, velocidade do escoamento do fluido e tempo de operação.

Tesfamariam et al. (2015) projetaram e analisaram um coletor solar de convecção natural comparando os resultados experimentais com aqueles obtidos por simulação numérica computacional. A temperatura máxima atingida foi de 77 °C para uma vazão mássica de ar de 0,0564 kg/s e uma irradiação de aproximadamente 1021 W/m<sup>2</sup>, obtendo uma eficiência de 21,5 %. Os autores concluem que a eficiência pode ser melhorada utilizando uma superfície absorvente ondulada para provocar turbulência e utilizar materiais isolantes para evitar as perdas térmicas.

Manjunath et al. (2017) estudaram a influência da presença de esferas geradoras de turbulência na eficiência térmica de coletores solares de placas planas. Os resultados simulados com auxílio do CFD (Fluido Dinâmica Computacional - *Computational Fluid Dynamics*) foram validados experimentalmente. Os autores obtiveram um aumento de eficiência utilizando o escoamento com turbulência até um determinado número de Reynolds. Entretanto, a partir de um Reynolds maior, a eficiência pode ser reduzida em comparação com a construção do coletor sem o aparato proposto.

## **2.4 Análise energética**

Ong (1995) propôs um modelo matemático e o procedimento de solução para prever a eficiência térmica de coletores solares de placas planas com fluxo de ar forçado. Trata-se de um modelo bidimensional, o qual consiste em aplicar a equação de conservação de energia em suas partes principais: placas planas e o fluido de trabalho. Se a temperatura da

vizinhança for conhecida, é possível determinar as temperaturas das placas e do fluido para qualquer ponto do coletor.

O procedimento de resolução é iterativo e consiste em dividir o coletor em várias regiões ao longo de seu comprimento. As equações de energia são resolvidas para cada região de modo a atualizar os valores da temperatura a cada nova iteração até que se alcance o erro desejado, ou seja, obtenha a convergência. Isso é necessário, pois as temperaturas média e de saída do fluido são assumidas no início da resolução de cada porção.

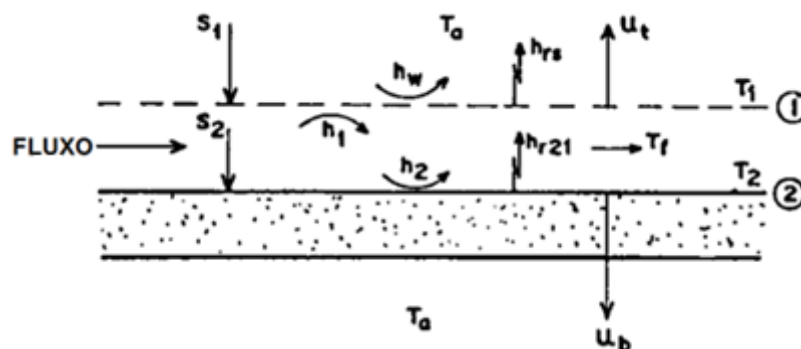
Ao obter a convergência de uma seção, o procedimento é resolver as equações para a seção seguinte, mas utilizando a temperatura de entrada do fluido para a nova seção igual à temperatura de saída do fluido da seção anterior, obtendo então, uma continuidade. Isso é repetido para todas as seções do coletor, resultando em um mapeamento do coletor como um todo ao final do procedimento.

#### 2.4.1 Modelagem matemática

O coletor solar de placas planas com canal simples é constituído por três partes principais que devem, obrigatoriamente, ser analisadas: a placa inferior, a placa superior e o volume de controle contendo o fluido de trabalho, no caso, o ar.

Os processos de transferência de calor que ocorrem entre estes elementos são: absorção de energia solar pela placa superior; absorção de energia solar pela placa inferior; transferência de calor entre as placas devido à irradiação; transferência de calor por convecção entre o fluido e ambas as placas; e perda de calor das placas para o ambiente. A Figura 5 ilustra os processos de transferência de calor em um coletor de canal simples.

Figura 5 – Processos de transferência de calor em um coletor de canal simples.



Fonte: Adaptado de ONG, 1995.

Na Figura 5, estão representados: o coeficiente convectivo entre a placa superior e o ar ( $h_1$ ); o coeficiente convectivo entre a placa inferior e o ar ( $h_2$ ); o coeficiente convectivo entre a placa superior e a vizinhança ( $h_w$ ); o coeficiente de troca de calor por radiação entre as superfícies inferior e superior ( $h_{r21}$ ); o coeficiente de troca de calor por radiação entre a superfície superior e o céu ( $h_{rs}$ ); o coeficiente global de perda de calor inferior ( $U_b$ ); o coeficiente de perda de calor superior ( $U_t$ ); a temperatura da vizinhança (ambiente) ( $T_a$ ); a temperatura da placa superior ( $T_1$ ); a temperatura da placa inferior ( $T_2$ ); e a temperatura do fluido ( $T_f$ ).

No modelo obtido foi considerado que o ar entra no coletor com a mesma temperatura da vizinhança, há perdas de calor por convecção entre a placa superior e o ambiente, há troca de calor por radiação entre a superfície superior e o céu, há troca de calor por radiação entre a placa inferior e a superior e troca de calor por convecção entre o ar e as placas que formam o canal de escoamento. Além disso, o balanço de energia foi aplicado assumindo operação em regime permanente ou quase estático devido às variações de irradiação solar. O regime quase estático supõe que o volume de controle entra em equilíbrio a cada mudança das radiações solares com o tempo.

As equações 1, 2 e 3 representam o balanço de energia para a placa 1, placa 2 e volume de controle englobando o fluido.

$$S_1 + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_1(T_f - T_1) = U_t(T_1 - T_a) \quad (1)$$

$$S_2 - h_{r21}(T_2 - T_1) - h_2(T_f - T_2) = U_b(T_2 - T_a) \quad (2)$$

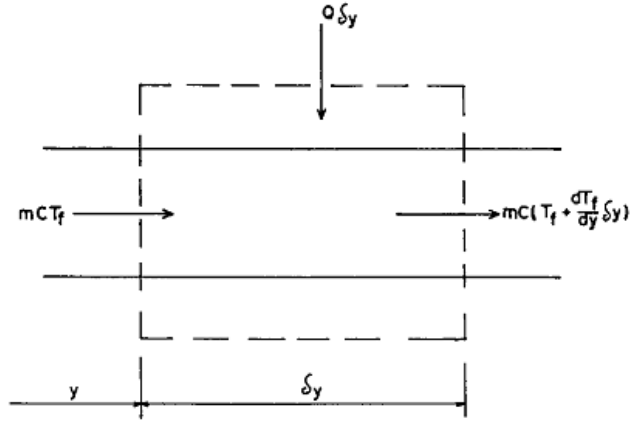
$$h_2(T_2 - T_f) = h_1(T_f - T_1) + Q \quad (3)$$

Na Equação 3, há presença da quantidade líquida de calor absorvida pelo fluido ao escoar entre as placas ( $Q$ ). Essa quantidade de calor pode ser obtida aplicando um balanço de energia para um volume de controle infinitesimal ao longo do escoamento. A Figura 6 representa o volume de controle infinitesimal no qual foi desenvolvida a análise.

O ar entra na seção com um fluxo mássico ( $\dot{m}$ ) que possui temperatura ( $T_f$ ) e o mesmo fluxo mássico deixa o volume de controle com um acréscimo de temperatura devido à absorção de calor pelo fluido  $\left(T_f + \frac{dT_f}{dy} \partial_y\right)$ . O calor específico do ar ( $C$ ) foi considerado

entre as temperaturas de 350 a 450 K. O volume de controle infinitesimal possui comprimento infinitesimal ( $\delta y$ ) e largura igual à largura do coletor (W).

Figura 6 – Volume de controle diferencial ao longo do fluxo de escoamento.



Fonte: ONG, 1995.

A análise é dada pelas equações a seguir (4-a, 4-b, 4-c e 4-d).

$$\dot{m} C T_f + Q W \delta y - \dot{m} C \left( T_f + \frac{dT_f}{dy} \delta y \right) = 0 \quad (4-a)$$

$$\frac{Q W}{\dot{m}} C = \frac{dT_f}{dy} \quad (4-b)$$

$$\int_{T_{f,i}}^{T_{f,o}} dT_f = \int_0^L \frac{Q W}{\dot{m} C} dy \quad (4-c)$$

$$T_{f,o} - T_{f,i} = \frac{Q W}{\dot{m} C} L \quad (4-d)$$

A Equação 4-d revela que a temperatura varia linearmente ao longo de uma seção do coletor solar. De acordo com Ong (1995), essa constatação é válida para seções suficientemente pequenas.

A temperatura média do ar é a média aritmética entre as temperaturas de entrada e saída, conforme está na Equação 5.

$$T_f = \frac{T_{f,i} + T_{f,0}}{2} \quad (5)$$

Substituindo na Equação 4-d e fazendo algumas manipulações matemáticas, é possível definir o calor recebido pelo ar em termos da temperatura média do ar e da temperatura de saída da seção em análise, conforme a Equação 6.

$$Q = \frac{2\dot{m}C}{WL} (T_f - T_{f,i}) \quad (6)$$

Definindo o termo  $\tau = \frac{2mC}{WL}$  é possível reescrever a Equação 6 na forma em que está apresentada a Equação 7.

$$Q = \tau(T_f - T_{f,i}) \quad (7)$$

Substituindo a Equação 7 na Equação 3 e realizando algumas manipulações matemáticas, obtém-se a Equação 8.

$$h_1 T_1 - (h_1 + h_2 + \tau) T_f + h_2 T_2 = -\tau T_{f,i} \quad (8)$$

Manipulando matematicamente as equações 1 e 2, obtém-se, respectivamente, as equações 9 e 10.

$$(h_1 + h_{r21} + U_t) T_1 - h_1 T_f - h_{r21} T_2 = S_1 + U_t T_a \quad (9)$$

$$-h_{r21} T_1 - h_2 T_f + (h_2 + h_{r21} + U_b) T_2 = S_2 + U_b T_a \quad (10)$$

Esse conjunto de equações formam um sistema linear para as variáveis  $T_1$ ,  $T_f$  e  $T_2$ , o qual pode ser representado pela Equação matricial 11-b.

$$[A][T] = [B] \quad (11-a)$$

$$\begin{bmatrix} h_1 + h_{r21} + U_t & -h_1 & -h_{r21} \\ h_1 & -(h_1 + h_2 + \tau) & h_2 \\ -h_{r21} & -h_2 & h_2 + h_{r21} + U_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_f \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + U_t T_a \\ -\tau T_{f,i} \\ S_2 + U_b T_a \end{bmatrix} \quad (11-b)$$

A solução é obtida utilizando a Equação 12.

$$[T] = [A]^{-1}[B] \quad (12)$$

#### 2.4.2 Algoritmo para solução

O coletor deve ser dividido em um número finito de volumes de controles, sendo que, para o primeiro volume de controle, a temperatura de entrada do ar é considerada a mesma do ambiente ( $T_{f,i} = T_a$ ). Os demais volumes de controle assumem valores para temperatura de entrada do ar, temperatura das placas superior e inferior e temperatura média do fluido, de modo a satisfazer a continuidade. Ou seja, para uma porção (k) qualquer do coletor, temos as condições de contorno dadas pelas Equações 13-a a 13-d.

$$T_{f,k} = T_{f,k-1} \quad (13-a)$$

$$T_{fi,k} = T_{fo,k-1} \quad (13-b)$$

$$T_{1,k} = T_{1,k-1} \quad (13-c)$$

$$T_{2,k} = T_{2,k-1} \quad (13-d)$$

Dessa maneira, é possível executar a análise para todas as seções e obter o resultado global. É importante destacar que, para a resolução de cada porção, é necessário realizar um número finito (n) de iterações até que a resposta alcance a convergência, ou seja, atinja um erro tão pequeno quanto se queira em relação à última iteração.

O método de Ong (1995) foi implementado com auxílio do *software* Scilab, no qual foi utilizado a Equação 14 para calcular o erro necessário como critério de convergência.

$$e = \frac{|T_n - T_{n-1}|}{T_n} \quad (14)$$

Ao final do processo, para cada porção é possível calcular o valor da temperatura da saída ( $T_{o,k}$ ) do ar utilizando a Equação 15.

$$T_{o,k} = 2T_{f,k} - T_{i,k} \quad (15)$$

A eficiência é obtida utilizando a Equação 16, a qual é a razão entre o calor absorvido pelo fluido de trabalho pela radiação solar incidente no coletor solar. Na Equação 16, o termo  $L_k$  é o comprimento da seção analisada.

$$\eta_k = \frac{\dot{m}C}{SWL_k} (T_{o,k} - T_{i,k}) \quad (16)$$

Com este modelo teórico é possível estimar a eficiência de coletores solares de placas planas de canal simples que utilizam ar como fluido de trabalho. Além disso, é possível obter valores das temperaturas das placas superior e inferior, bem como a temperatura média do ar ao longo do comprimento, utilizadas para o dimensionamento do protótipo utilizado no estudo.

## 2.5 Simulação computacional

Todos os pacotes de Fluido Dinâmica Computacional (CFD) são baseados nas equações fundamentais que governam a dinâmica dos fluidos. Dentre elas estão a equação da continuidade, momento e conservação de energia. Além de definir as equações para a resolução do problema físico, também faz-se necessário definir o modelo para o fluido (ANDERSON JR., 1995).

Em geral, o método dos elementos finitos é versátil em aplicações envolvendo geometrias complexas ou irregulares em uma, duas ou três dimensões do espaço. Suas primeiras aplicações foram no final da década de 1950. Contribuições significantes em CFD começaram com os métodos de Garlekin-Petrov, Taylor-Galerkin e hp adaptativo, além de outros trabalhos (CHUNG, 2002).

Segundo Ferziger e Peric (2002), o método consiste em discretizar um domínio em um número finitos de elementos. Cada elemento é formulado segundo uma função de interpolação e as equações fundamentais são resolvidas para o conjunto de todos os elementos. Utilizando o método de Garlekin, é possível representar as equações diferenciais como um sistema de equações algébricas e obter a solução numérica do modelo físico.

### 2.5.1 Pacote de elementos finitos Elmer CSC

O Elmer é um *software* de simulação computacional de código aberto desenvolvido, principalmente, pela *IT Center of Science* (CSC). Seu desenvolvimento teve início em 1995, com a colaboração de universidades finlandesas, institutos de pesquisa e a indústria. Depois da sua publicação como código aberto em 2005, seu desenvolvimento tornou-se internacional (CSC, 2017).

Segundo Raback (2014), o pacote Elmer contém soluções para os mais diversos tipos de modelos matemáticos. Ele resolve equações diferenciais parciais utilizando o método dos elementos finitos. A lista a seguir resume os principais:

- a) transferência de calor;
- b) escoamento de fluidos;
- c) transporte de massa;
- d) elasticidade;
- e) eletromagnetismo e;
- f) acústica.

Várias publicações científicas foram conduzidas com auxílio deste pacote. Raback (2004) simulou o fenômeno eletromecânico de deformação em materiais devido às forças eletrostáticas oriundas de uma diferença de potencial; Bondarenko (2012) utilizou o *software* para estudar o projeto de geradores de plasma; Ulvrová (2012) modelou o acoplamento convectivo de um sistema em fusão e solidificação aplicado à evolução térmica de um oceano de magma basal; Zhang (2014) modelou geradores de campo magnético permanente sem ferro, entre outras.

### 2.5.2 Equacionamento

Segundo Raback et al. (2014), a Equação 17 expressa a equação de calor para fluidos incompressíveis que é resultado da conservação de energia em conjunto com a lei de Fourier usada para modelar a condução de calor. A equação pode ser não linear devido à temperatura dependendo da condutividade térmica ou pela radiação de calor.

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = \vec{\tau} : \vec{\epsilon} + \rho h \quad (17)$$



Nessa Equação,  $\rho$  é a densidade;  $c_p$  é o calor específico;  $T$ , a temperatura;  $\vec{u}$ , a velocidade de convecção;  $k$  é a condutividade térmica; e  $h$  é a geração de calor. O termo  $\bar{\tau}$ :  $\bar{\epsilon}$  é o calor gerado pelo atrito viscoso, o qual é negligenciável na maioria dos casos.

Para fluidos newtonianos, a parte viscosa do tensor de tensão é dada pela Equação 18, na qual  $\bar{\epsilon}$  é a taxa de deformação do tensor linearizada.

$$\bar{\tau} = 2\mu\bar{\epsilon} \quad (18)$$

O módulo de Equação de calor do Elmer é capaz de realizar simulações de transferência de calor por condução, convecção e radiação difusa. Além disso, é possível realizar o acoplamento com outros módulos, incluindo convecção por escoamento de fluido, aquecimento por atrito, aquecimento resistivo e outros.

A condição de contorno de Dirichlet dada pela Equação 19 é a temperatura, que pode ser uma constante ou função do tempo, posição ou outras variáveis.

$$T = T_b \quad (19)$$

O fluxo de calor depende do coeficiente de transferência de calor ( $\alpha$ ) e da temperatura externa ( $T_{ext}$ ), podendo ser descrito pela Equação 20.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{ext}) \quad (20)$$

Ambas as variáveis  $\alpha$  e  $T_{ext}$  podem ser constantes ou funções do tempo, posição ou outras variáveis.

O fluxo de calor devido à radiação pode ser idealizado segundo a Equação 21.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \sigma\epsilon(T^4 - T_{ext}^4) \quad (21)$$

Na Equação 21,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman e  $\epsilon$  é emissividade da superfície. A emissividade e a temperatura externa podem ser, novamente, funções do tempo, posição ou outras variáveis.

Se a superfície denominada  $j$  está recebendo radiação de outras superfícies no sistema, então o fluxo de calor é dado pela Equação 22.

$$-k_j \frac{\partial T_j}{\partial n_j} = \sigma \varepsilon_j (T_j^4 - \frac{1}{A_j \varepsilon_j} \sum_{i=1}^N G_{ij} \varepsilon_i T_i^4 A_i) \quad (22)$$

Na Equação acima, os índices i e j referem-se às superfícies i e j. Os parâmetros  $A_i$  e  $A_j$ , à área das superfícies específicas. Os fatores  $G_{ij}$  são os fatores de Gebhardt e N representa o número total de superfícies radiantes presentes no sistema. A emissividade é considerada constante em cada superfície.

A Equação de calor é não linear quando a radiação é modelada. O termo não linear na condição de contorno pode ser linearizado segundo a Equação 23, na qual, a temperatura obtida da iteração anterior é  $\Gamma$ .

$$T^4 - T_{ext}^4 \approx (\Gamma^3 + T_{ext} \Gamma^2 + T_{ext}^2 \Gamma + T_{ext}^3)(T - T_{ext}) \quad (23)$$

O fluxo de calor também pode ser conhecido e aplicado como uma condição de contorno utilizando a Equação 24.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (24)$$

O critério para a convergência é a diferença da norma do campo entre duas iterações consecutivas ser pequena o suficiente para satisfazer a Equação 25.

$$\|T_i - T_{i-1}\| < \epsilon \|T_i\| \quad (25)$$

O escoamento viscoso de fluidos é governado pelas equações de Navier-Stokes, que são derivadas dos princípios de conservação de massa, momento e energia. Os fluidos podem ser newtonianos ou não newtonianos (RABACK et al., 2014).

As Equações 26 e 27 descrevem o momento e a continuidade, respectivamente.

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) - \nabla \cdot \bar{\bar{\sigma}} = \rho \vec{f} \quad (26)$$

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho \right) + \rho (\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (27)$$

O termo  $\bar{\bar{\sigma}}$  é o tensor de tensão que pode ser dado pela Equação 28 para fluidos newtonianos:

$$\bar{\sigma} = 2\mu\bar{\varepsilon} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \vec{u})\bar{I} - p\bar{I} \quad (28)$$

Em que  $\mu$  é a viscosidade,  $p$  é a pressão,  $\bar{I}$  é o tensor unitário e  $\bar{\varepsilon}$  é a taxa de deformação do tensor linearizada, como exemplificado na Equação 29.

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (29)$$

A densidade de um gás ideal depende da pressão e temperatura e pode ser dada pela Equação de estado 30, a seguir:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (30)$$

Em que  $R$  é constante dos gases ideais dada pela Equação 31, na qual  $\gamma$  é a razão de calores específicos.

$$R = \frac{\gamma - 1}{\gamma} c_p \quad (31)$$

Um fluido incompressível é caracterizado pela condição de densidade constante ( $\rho = cte$ ), do qual segue que:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (32)$$

Para este caso, a Equação de Navier-Stokes pode ser escrita conforme Equação 33.

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) - \nabla \cdot 2\mu\bar{\varepsilon} + \nabla p = \rho \vec{f} \quad (33)$$

O termo  $\rho \vec{f}$  da Equação 33 representa a força devido à gravidade, no qual o vetor  $\vec{f}$  é a aceleração gravitacional.

Fluidos compressíveis são modelados pelas equações 26 a 31. Então, é possível substituir a Equação de estado 30 pela Equação 34,

$$\rho = \frac{1}{c^2} p \quad (34)$$

em que  $c = c(p, T, \dots)$  é a velocidade do som.

Para escoamento incompressível com presença de calor, considera-se válida a aproximação de Boussinesq. Isto significa que a densidade do fluido depende linearmente da temperatura, de acordo com a Equação 35.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \quad (35)$$

Na equação acima,  $\beta$  é o coeficiente de expansão de volume e  $T_0$  é a temperatura no estado de referência.

A condição de contorno de Dirichlet é a componente da velocidade dada pela Equação 36.

$$u_i = u^b \quad (36)$$

De acordo com Raback et al. (2014), o critério para a convergência é dado pela Equação 37, na qual a diferença no campo de velocidades entre duas iterações consecutivas deve ser tão pequena quanto o valor  $\epsilon$ .

$$\|u_i - u_{i-1}\| < \epsilon \|u_i\| \quad (37)$$

## 2.6 Aquisição e monitoramento de dados

De acordo com Gad e Gad (2015), um sistema de aquisição de dados é composto de quatro partes principais: sensores, condicionador de sinal, conversor analógico digital e o programa de aquisição de dados.

Os sensores são elementos que recebem as variações físicas do ambiente ou sistema e transformam em impulsos elétricos. Em um sistema de aquisição de dados, a escolha correta dos sensores é essencial para a obtenção dos dados com precisão necessária à qualidade do processo ou controle das variáveis deste. Os condicionadores de sinal são responsáveis por fazer a adaptação do sinal para o conversor digital e têm função de amplificar, isolar e filtrar os sinais dos sensores (MAURIZIO, 2013).

Segundo Batlles e Rosiek (2008), o conversor analógico digital (ADC) traduz o sinal recebido do condicionador em uma sequência numérica adequada ao tratamento do sinal

adquirido. Já o programa de aquisição converte os valores digitais para o valor da variável monitorada conforme é o comportamento físico do sensor; além disso, é sua função comunicar ao usuário os dados coletados, permitindo sua leitura, interpretação e armazenamento.

### 2.6.1 Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma de código aberto baseada em *software* e *hardware* simples e de baixo custo, para aplicação em projetos eletrônicos de aquisição, monitoramento e controle (ARDUINO, 2017).

Segundo Fuentes et al. (2014), o arduino UNO é uma placa de desenvolvimento de baixo custo, fácil adaptação e utilização. O *hardware*, mostrado na Figura 7, baseado no microcontrolador ATmega328, tem 14 portas digitais de entrada e saída, 6 portas analógicas de entrada e saída, um conector de energia e uma entrada de comunicação USB.

Figura 7 – Plataforma Arduino modelo UNO.



Fonte: Arduino, 2017.

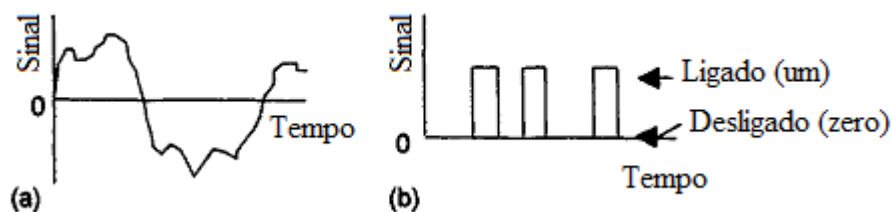
O ADC possui uma faixa de entrada de 5 V, mas pode ser modificado por *hardware* com uma nova tensão no pino AREF até 0,5 V ou por *software* em 1,1 V. A configuração de 1,1 V permite medir 1024 níveis de voltagem com passo de 1,07 mV. Essa resolução é suficiente para a maioria das aplicações de pesquisa e desenvolvimento como, por exemplo, adquirir dados de sensores analógicos com boa precisão (FUENTES et al., 2017).

### 2.6.2 Sensores de temperatura

Thomazini (2011) explica que sensores são dispositivos que interagem com a energia do ambiente, podendo esta ser luminosa, térmica, cinética e outras, relacionando informações de uma grandeza que precisa ser quantificada como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, entre outras.

Muitas vezes, o sinal de saída de um sensor deve ser manipulado para que suas características elétricas sejam compatíveis ou adequadas para serem utilizadas pelo controlador. Os sensores possuem uma grande classificação que os separam em analógicos e digitais. O sinal dos dispositivos analógicos, Figura 8, pode assumir qualquer valor ao longo do tempo dentro de sua faixa de operação. Já o sinal dos sensores digitais assumem apenas dois valores: zero ou um. O conjunto de pulsos é decodificado em uma informação que traduz a excitação física à qual está submetida (BOLTON, 2004).

Figura 8 – Tipos de sinais: (a) analógico; (b) digital.

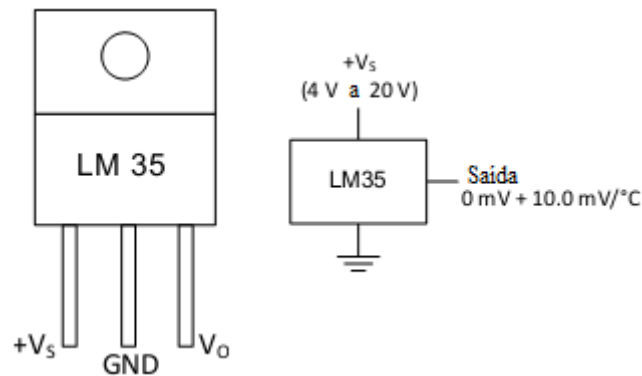


Fonte: Adaptado de BOLTON, 2004.

Os sensores de temperatura, por exemplo, apresentam os mais diversos princípios físicos e formas construtivas. Os mais comuns são os termistores, os termopares, os pares bimetalícos, circuitos integrados, pirômetros, entre outros. Neste contexto, ao selecionar um sensor, é importante observar algumas características tais como: sensibilidade, exatidão, precisão, alcance ou faixa de operação, estabilidade, velocidade de resposta, calibração, dimensões, manutenção e custo (THOMAZINI, 2011).

Conforme o Texas Instruments (1999), o sensor de temperatura LM-35 é um circuito integrado com uma diferença de potencial de saída linearmente proporcional à temperatura do meio em graus centígrados. A sugestão de operação elétrica mostrada na Figura 9 é funcional para uma faixa de temperatura de 2 °C a 150 °C.

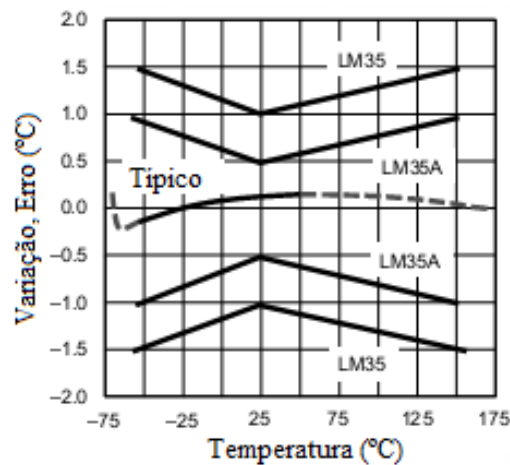
Figura 9 – Sensor LM-35 e seu esquema de pinos.



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 1999.

O dispositivo não requer calibração para oferecer uma exatidão de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  na temperatura ambiente e  $\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  operando entre  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A Figura 10 representa o erro de medida para a faixa de operação do sensor (TEXAS INSTRUMENTS, 1999).

Figura 10 – Erro de medida LM-35.



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 1999.

Para sua correta operação, o dispositivo necessita de uma tensão de alimentação ( $V_s$ ) entre 4 V e 30 V, apresentando um autoaquecimento baixo, aproximadamente  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  quando imerso em ar. A tensão de saída ( $V_o$ ) é o sinal analógico recebido pelo sistema de monitoramento que tem relação linear com a temperatura, sendo de  $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  (TEXAS INSTRUMENTS, 1999).

### 2.6.3 *Software numérico Scilab*

Segundo a Scilab Enterprises (2017), “o Scilab é um *software* livre e de código aberto para computação numérica que fornece um poderoso ambiente para aplicações de engenharia e científica”.

O Scilab reconhece vários tipos de dados. Os objetos escalares são constantes, booleanos, polinômios, cordas e racionais. Outros objetos básicos são listas e funções. O tipo de dados da lista pode ser uma coleção de objetos de dados não necessariamente do mesmo tipo. O *software* considera uma série de objetos de dados como matrizes e vetores. O Scilab suporta uma grande quantidade de funções nas áreas de matemática padrão, álgebra linear e análise numérica. Além disso, o Scilab oferece suporte a um grande número de funções referentes a estatísticas, estatísticas estocásticas e distribuições, embora isso não seja sua característica forte. O Scilab possui suporte incorporado para álgebra linear, programação linear quadrática restrita e programação não linear, troca de dados com o Matlab, controle e processamento de sinal. Além das funções internas, existem alguns pacotes, escritos pelos usuários do Scilab, que estão disponíveis gratuitamente na internet e oferecem suporte a muitas funções para utilitários de importação e exportação (GLAVELIS et al., 2010).

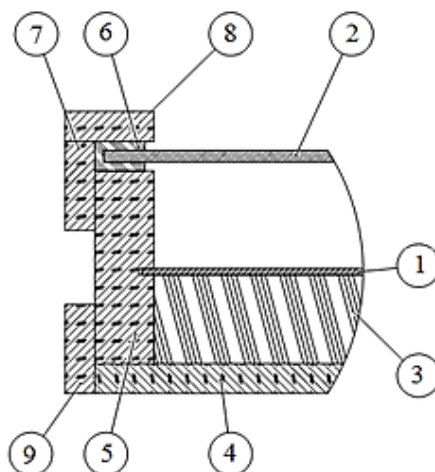
Segundo Bordeianu et al. (2008), ao comparar, o Matlab parece ser uma das normas atuais da computação científica. Embora seja poderoso e confiável, é muito caro. Daí a importância da disponibilidade de pacotes como o Scilab, que possuem uma sintaxe parecida. Dirigido em aplicações científicas, o Scilab oferece módulos de aplicações para controles de sistema e processamento de sinal, uma interface de programação e visualização, além de importar e exportar dados em vários formatos de arquivo.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O coletor solar com passe simples superior foi escolhido para a análise devido a ser o modelo mais comum e de baixo custo. No que tange aos materiais, estes foram selecionados de acordo com a função do elemento que constituem. A placa superior é de vidro para permitir a incidência de radiação solar na placa inferior, que, por sua vez, é de aço revestido com tinta preta. A estrutura do equipamento foi desenvolvida em madeira devido à facilidade de montagem. Foi utilizada uma camada de isolante térmico abaixo da placa de aço para evitar a perda de calor para o ambiente, além de um ventilador centrífugo para proporcionar o fluxo mássico do ar no interior do coletor. O corte de seção transversal contendo alguns destes elementos é ilustrado na Figura 11 e os respectivos materiais estão relacionados na Tabela 1.

Figura 11 – Seção transversal do coletor solar.



Fonte: O autor, 2016.

Tabela 1 – Principais elementos do coletor solar.

Identificação	Elemento	Material
01	Placa inferior ou absorvedora	Aço com pintura de cor preta
02	Placa superior ou transparente	Vidro
03	Isolante térmico	EPS ou lã de rocha
04	Estrutura inferior	Madeira
05	Estrutura lateral	Madeira
06	Perfil de fixação	Borracha
07	Suporte lateral de fixação	Madeira
08	Suporte superior de fixação	Madeira
09	Suporte lateral	Madeira

Fonte: O autor, 2016.

### 3.1 Dimensionamento

A escolha das dimensões principais do modelo experimental foi conduzida pela modelagem proposta por Ong (1995) para um coletor de placas planas paralelas operando com ar como fluido de trabalho. Para a implementação do procedimento utilizou-se o Scilab.

Alguns parâmetros idealizados para o clima local, materiais, condições do ar e outros utilizados para executar a solução estão relacionados na Tabela 2. As dimensões foram variadas até a melhor combinação de tamanho e eficiência.

Tabela 2 – Parâmetros do coletor.

Parâmetro	Valor utilizado
Fluxo de radiação solar	700 W/m <sup>2</sup>
Temperatura ambiente	300 K
Emissividade da placa inferior	0,95
Absortividade da placa inferior	0,95
Absortividade da placa superior	0,06
Transmitância da placa superior	0,87
Inclinação do coletor com a horizontal	25°
Velocidade do ar ambiente	0,5 m/s
Condutividade térmica do isolante	0,030 – 0,045 W/mK

Fonte: O autor, 2016.

O modelo está representado na Figura 12 possuindo 1640 mm de comprimento, 720 mm de largura e 95 mm de espessura, com um canal retangular para o fluxo de fluido de 660 mm por 36 mm. A espessura do isolante foi definida em 30 mm.

Figura 12 – Modelo renderizado do coletor solar.

a) Vista isométrica frontal



b) Vista isométrica posterior



Fonte: O autor, 2016.

### 3.2 Aquisição de dados

As portas analógicas do Arduino possuem 10 *bits* de resolução, o que significa que a informação pode ser obtida ou enviada em um número inteiro dentro da faixa de 0 a 1023, o que permite realizar a conversão de tensão para temperatura utilizando a Equação 38.

$$T(i) = 500V(i)/1023 \quad (38)$$

Na Equação acima,  $T(i)$  é o valor da temperatura de um sensor em posição qualquer;  $V(i)$  é o valor de tensão lido pelo *hardware* em milivolts. É importante notar que as constantes utilizadas consideram a variação linear do sensor, a resolução da porta analógica e a conversão da unidade de tensão.

Para o monitoramento da temperatura, foi elaborado um sistema de aquisição de dados em tempo real com seis sensores de temperatura modelo LM-35 integrando o Arduino e o Scilab. Os sensores interagem com o fenômeno natural o qual se deseja mensurar, no caso a temperatura, gerando uma variação na sua tensão de saída que é o sinal lido pelo microcontrolador. Essa informação é enviada ao computador utilizando comunicação serial.

Os sinais são empacotados em *bits*, em que cada *bit* do pacote é enviado sequencialmente. O Arduino envia as informações obtidas do sensor utilizando os códigos da tabela ASCII, como indicado na Tabela 3.

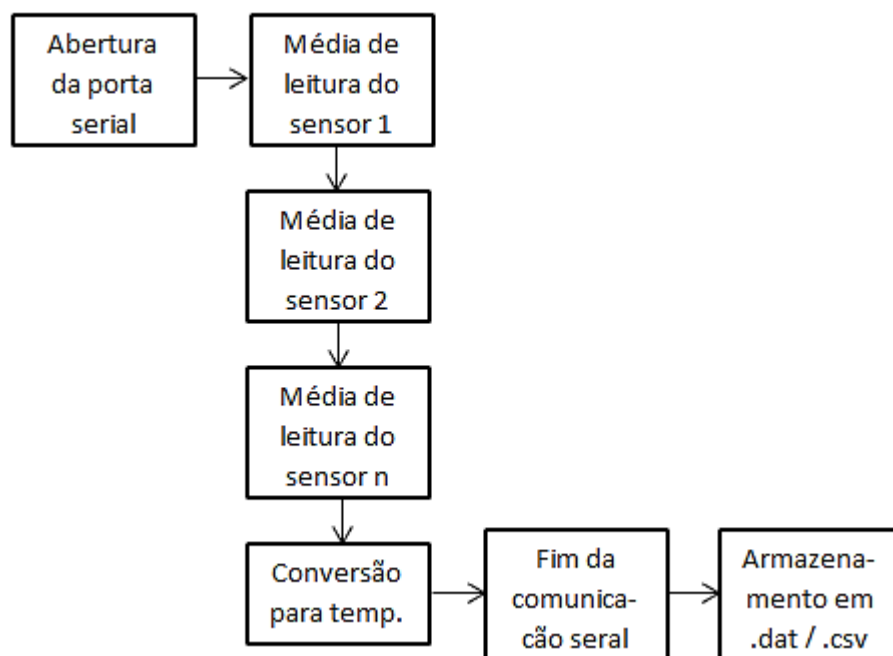
Tabela 3 – Códigos ASCII.

Referência	Decimal	Binário	Referência	Decimal	Binário
<b>0</b>	48	00110000	<b>a</b>	97	01100001
<b>1</b>	49	00110001	<b>b</b>	98	01100010
<b>2</b>	50	00110010	<b>c</b>	99	01100011
<b>3</b>	51	00110011	<b>d</b>	100	01100100
<b>4</b>	52	00110100	<b>e</b>	101	01100101
<b>5</b>	53	00110101	<b>f</b>	102	01100110
<b>6</b>	54	00110110	<b>g</b>	103	01100111
<b>7</b>	55	00110111	<b>h</b>	104	01101000
<b>8</b>	56	00111000	<b>i</b>	105	01101001
<b>9</b>	57	00111001	<b>j</b>	106	01101010

Fonte: O autor, 2017.

Neste contexto, a função do Scilab é ordenar a leitura dos sensores enviando um código predefinido ao microcontrolador, receber a informação codificada, decodificar a informação escrita em ASCII, converter a tensão para temperatura utilizando a Equação 38 e armazenar esta informação. O código foi desenvolvido para realizar a leitura de cada sensor 10 vezes com intervalo de tempo de 100 ms e obter a média dos valores. A lógica do algoritmo utilizado está representada na Figura 13. O tempo total de leitura de todos os sensores utilizados, sem considerar o tempo utilizado com processamento e comunicação, é aproximadamente 6,0 segundos.

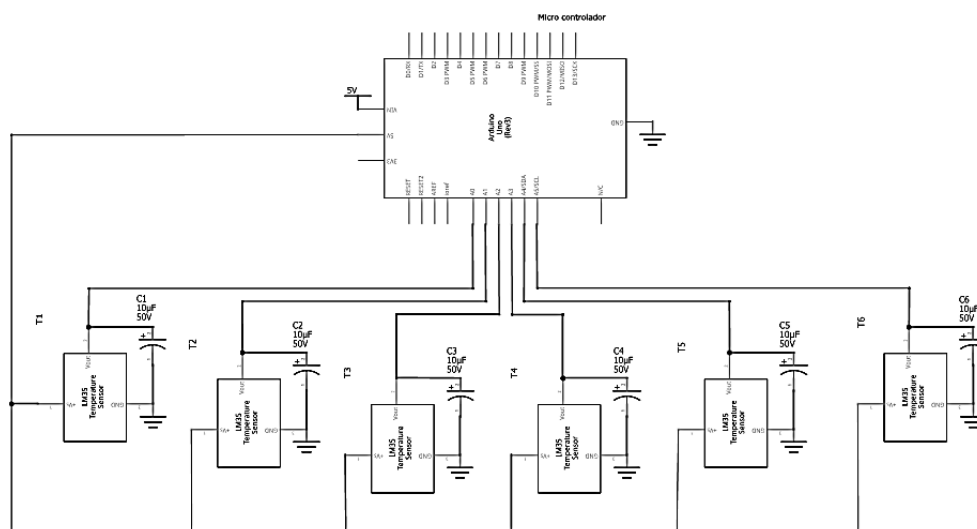
Figura 13 – Lógica do sistema de aquisição de dados.



Fonte: O autor, 2017.

A disposição dos componentes eletrônicos está exemplificada pela Figura 14. Os sensores de temperatura LM-35 possuem os pinos de saída de tensão e neutro conectados a um capacitor de 10  $\mu$ F. O capacitor atua de forma a manter o circuito interno do sensor energizado, proporcionando maior precisão nas leituras realizadas pelas portas analógicas do microcontrolador.

Figura 14 – Disposição dos sensores de temperatura.



Fonte: O autor, 2017.

### 3.2.1 Aquisição de temperatura realizada em área residencial

Como primeira etapa do procedimento experimental, foram realizadas medidas durante alguns dias do mês de janeiro do ano de 2017, em uma propriedade residencial da cidade de Maringá (PR) com latitude de 23,43° Sul e longitude 51,94° Oeste. O coletor foi direcionado para o Norte e recebeu insolação durante o período das 9h às 16h do horário local de verão.

A dificuldade encontrada quando se pretende caracterizar a temperatura do fluido de trabalho é a forma de acoplar o sistema de aquisição no equipamento para manter os sensores em contato com o escoamento. Nesta etapa optou-se por inserir o aparato de aquisição de dados no interior do canal de escoamento. Os sensores foram fixados na placa de vidro com auxílio de bornes isolante com 10 mm de espessura e distanciados a partir da entrada de ar, conforme a Tabela 4:

Tabela 4 – Posição dos sensores na primeira etapa.

Identificação	Posição
<b>S1</b>	50 mm
<b>S2</b>	350 mm
<b>S3</b>	650 mm
<b>S4</b>	950 mm
<b>S5</b>	1250 mm
<b>S6</b>	1550 mm

Fonte: O autor, 2017.

Além disso, utilizou-se como isolante o poliestireno expansível (EPS) em placas e a potência do ventilador foi definida em 50 % e 100 % do valor nominal utilizando o princípio da modulação de largura de pulso – *Pulse Width Modulation (PWM)*. A montagem experimental é demonstrada pela Figura 15.

Figura 15 – Primeira etapa experimental.

a) Disposição dos sensores.



b) Borne com sensor e capacitor.



c) Detalhe da entrada do ar.



Fonte: O autor, 2017.

### 3.2.2 Aquisição de temperatura realizada em estação climatológica

Como etapa final do procedimento experimental, foram realizadas medidas durante alguns dias do mês de agosto do ano de 2017, na Estação Climatológica Principal situada na Universidade Estadual de Maringá, com latitude de  $23,43^\circ$  Sul e longitude  $51,94^\circ$  Oeste. O coletor foi direcionado para o Norte e recebeu insolação durante o período das 9h às 17h do horário local.

Novamente, houve dificuldade em se estabelecer uma maneira de manter os sensores em contato com o fluido. Foram realizadas algumas modificações em relação ao primeiro método.

A primeira modificação refere-se ao método de fixação. Desta vez, furou-se o vidro em posições específicas e apenas o encapsulamento do sensor LM-35 foi inserido no interior do fluxo, ficando a uma distância de 5,0 mm da placa superior. A segunda modificação está relacionada à posição dos sensores ao longo do comprimento. O posicionamento foi alterado

conforme a Tabela 5, com intuito de avaliar a influência de uma saliência na placa absorvedora localizada entre os sensores identificados como S3 e S4.

Tabela 5 – Posição dos sensores no segundo experimento.

Identificação	Posição
<b>S1</b>	50 mm
<b>S2</b>	400 mm
<b>S3</b>	750 mm
<b>S4</b>	850 mm
<b>S5</b>	1200 mm
<b>S6</b>	1550 mm

Fonte: O autor, 2017.

Além disso, utilizou-se como isolante a lã de rocha em placas e a potência do ventilador foi mantida em 50 % e 100 % do valor nominal utilizando o princípio do *PWM*. A montagem experimental é demonstrada pela Figura 16.

Figura 16 – Segunda etapa de aquisição de dados.

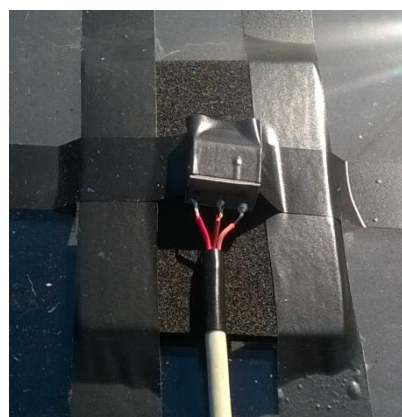
a) Disposição dos sensores



b) Furo para inserção do sensor.



c) Detalhe da fixação.



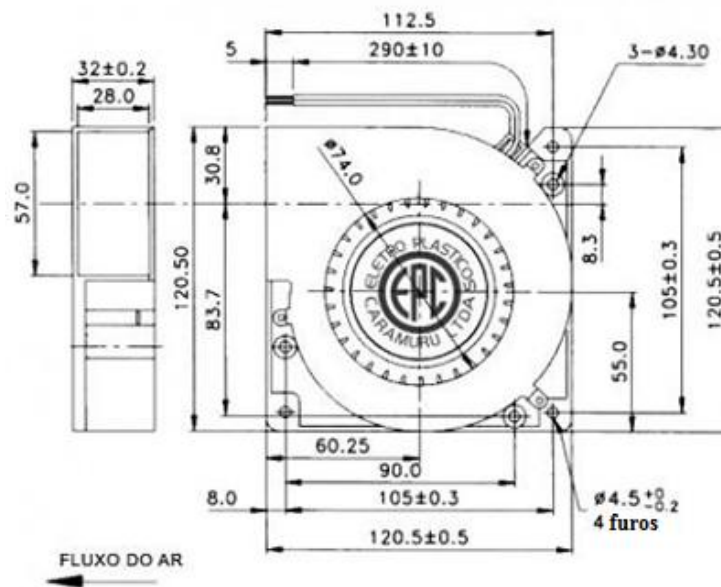
Fonte: O autor, 2017.



### 3.2.3 Vazão de ar

Para gerar o fluxo do fluido no interior do coletor foi utilizado um ventilador centrífugo de corrente contínua modelo Apollo-12, Figura 17, fabricado pela Electro Plásticos Caramuru Ltda. e distribuído pela Airfan.

Figura 17 – Ventilador centrífugo Apollo-12.



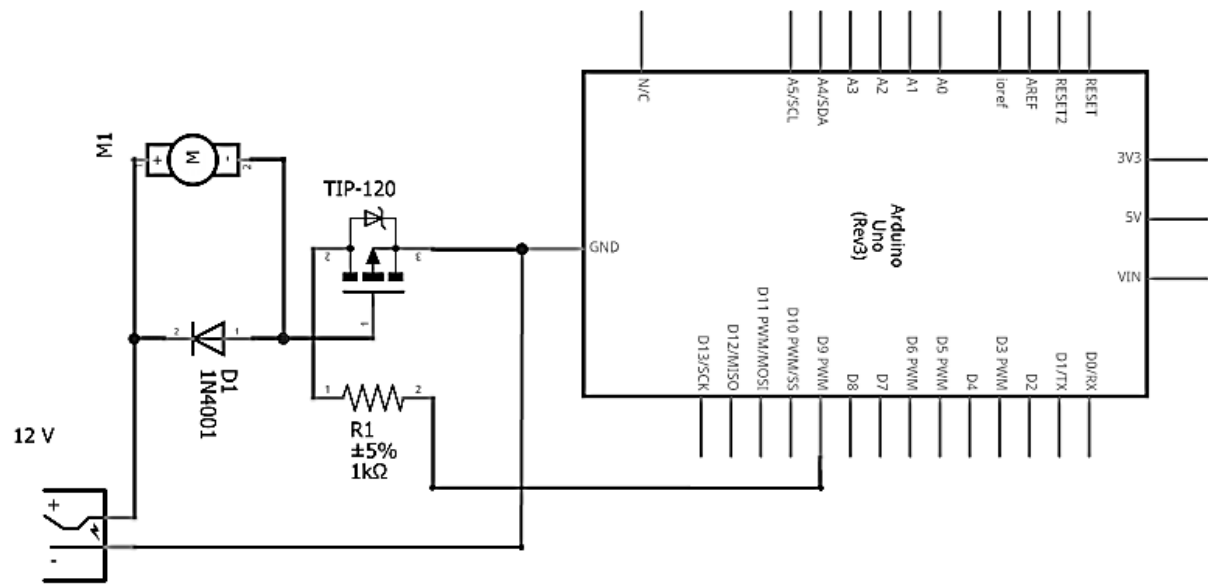
Fonte: AIRFAN, 2017.

A variação de vazão pode ser realizada controlando a potência fornecida ao ventilador utilizando o *PWM*. O princípio da modulação de largura de pulso é alternar o fornecimento da diferença de potencial ao sistema por meio de uma função degrau com pico no valor da D.D.P. nominal e o valor nulo. A área abaixo do gráfico representa a potência fornecida.

Para o experimento foi utilizada a potência de 100 % do ventilador, ou seja, sem uso do *PWM*, e a potência de 50 % com uso do *PWM*. O circuito responsável pelo *PWM*, Figura 18, utilizou um transistor TIP-120, um diodo 1N4001, um resistor de 1,0 k $\Omega$  e o microcontrolador Arduino, que possui portas que fornecem o pulso retangular responsável pela variação de tensão.



Figura 18 – Circuito *PWM* utilizado.



Fonte: O autor, 2017.

A velocidade do escoamento foi medida na saída do coletor solar utilizando um anemômetro portátil da Instrutherm, modelo AD-250, representado na Figura 19. Esta vazão é importante para a simulação computacional. A velocidade do ar é obtida com base no movimento de rotação provocada pela pá do sensor. Suas principais características estão resumidas na tabela 6.

Tabela 6 – Especificações do anemômetro utilizado.

Elemento	Especificação
Escala	0,4-30,0 m/s; 80-5910 ft/min; 1,4-10,8 km/h; 0,9-6,7 milha/h; 0,8-58,3 knots.
Precisão	Até 20 m/s: 3% da escala cheia Maior que 20 m/s: 4% da escala cheia
Resolução	0,1 m/s; 1 ft/min; 0,1 km/h; 0,1 mph; 0,1 knots.
Sensor	Rotor existente no aparelho.
Temperatura de operação	0 a 50 °C
Umidade de operação	Máx. 80%

Fonte: INSTRUTHERM, 2017.

Figura 19 – Anemômetro AD-250.



Fonte: INSTRUTHERM, 2017.

A entrada de ar, Figura 15-c, foi elaborada com diâmetro de 32,0 mm, sendo que o fluxo de ar é conduzido até ela por um tubo de PVC. Já a saída de ar do coletor, Figura 20, é constituída por três adaptadores de mangueira, popularmente conhecidos como espigões, com diâmetro de 12,7 mm.

Figura 20 – Saída de ar do coletor solar.



Fonte: O autor, 2017.

Considerou-se que o fluxo mássico é conservado na entrada e saída, utilizando a velocidade mensurada na saída para cálculo da vazão de ar no equipamento.

#### 3.2.4 Condições climáticas

A estação climatológica principal de Maringá possui uma unidade automática vinculada ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que realiza o monitoramento de variáveis climáticas, como temperatura máxima, temperatura mínima, velocidade do vento, intensidade de irradiação solar, pressão atmosférica, umidade relativa e precipitação pluviométrica para cada hora diária, considerando o fuso horário de Greenwich (UTC). Essas informações enviadas ao INMET, formam um conjunto de dados climatológicos das diversas

estações distribuídas pelo Brasil e estão disponíveis para consulta no *site* do instituto ([www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)).

Os dados de intensidade de irradiação registrados pela estação climatológica são obtidos por um piranômetro, como exibido na Figura 21. Tais dados podem ser utilizados para equipamentos dentro ou fora da estação. Entretanto, para um equipamento distante pode haver variação na medida de irradiação recebida pelo piranômetro e pelo equipamento estudado devido à presença, principalmente, de nuvens ou outros anteparos como prédios, casas, entre outros.

Figura 21 – Piranômetro à esquerda e pluviômetro à direita utilizados na estação climatológica.



Fonte: O autor, 2017.

A medição de temperatura é feita por meio da corrente de 1,0 mA de um termorresistor linear Pt100 e um resistor de referência de 100  $\Omega$  com amostragem a cada 5,0 segundos. O valor instantâneo é a média de um minuto, ou seja, 12 amostras.

Os dados eólicos são realizados por um transmissor de vento modelo Vaisala WT521, controlado por um microprocessador. Esse aparelho realiza medidas a cada 0,25 segundos e usa estes valores para calcular uma média móvel de 3,0 segundos para a velocidade e para a direção do vento. Estas médias são enviadas pela porta serial uma vez por segundo. A unidade central utiliza estas informações para calcular os valores médios de 10 minutos e os valores de rajadas. (INMET, 2011)

### 3.3 Modelo computacional

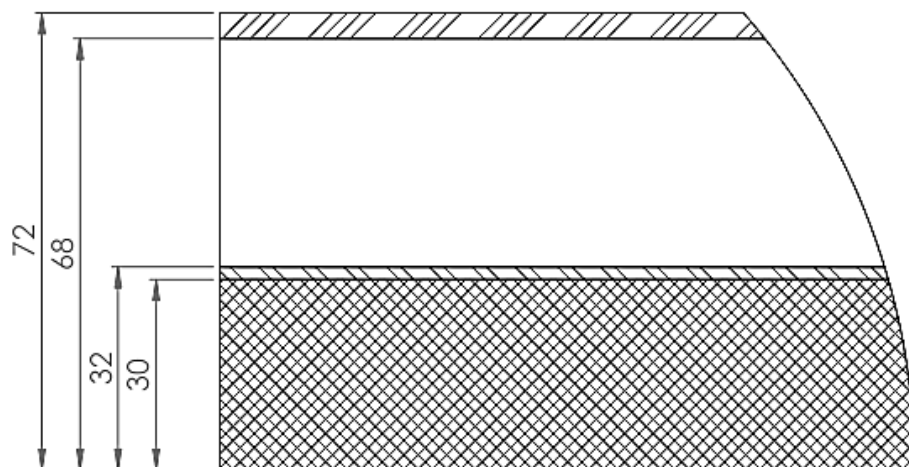
A simulação dos fenômenos físicos que ocorrem no interior do coletor solar foi realizada utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do pacote multifísico Elmer CSC. A predição do campo de temperatura no interior do coletor permite avaliar a interferência de algumas variáveis na eficiência da conversão da energia de radiação em calor fornecido ao fluido de trabalho.

O modelo computacional foi executado com as condições de contorno do experimento realizado em área residencial e, também, para o experimento realizado na estação climatológica para cinco horários adjacentes em um dia de céu com poucas nuvens, totalizando 10 simulações para validar o modelo proposto.

#### 3.3.1 Pré-processamento

O modelo utilizado foi idealizado em um plano compreendendo os principais elementos do coletor solar: isolante, placa absorvedora, canal de escoamento e placa superior. É importante destacar que o comprimento do coletor é de 1600 mm e a inclinação de  $25^\circ$  com a horizontal, assim como os experimentos foram realizados. As dimensões utilizadas estão representadas na Figura 22.

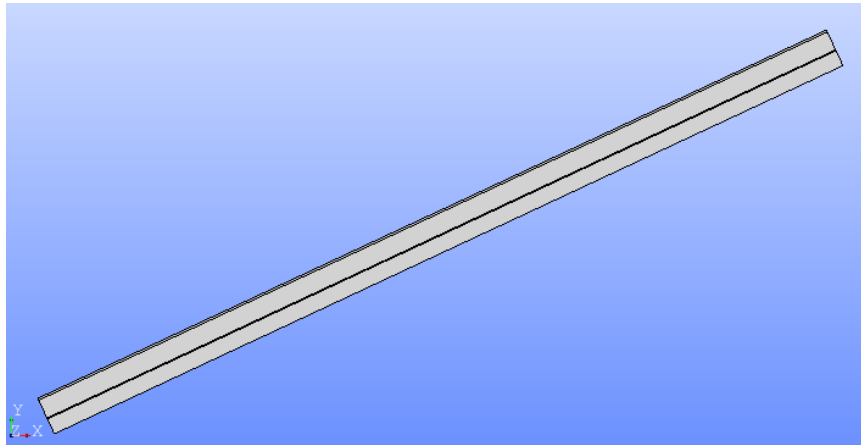
Figura 22 – Dimensão de cada porção do domínio.



Fonte: O autor, 2017.

O domínio, representado na Figura 23, foi desenvolvido no *software* Salome, que é uma plataforma de código livre, aberto e de integração para simulações numéricas.

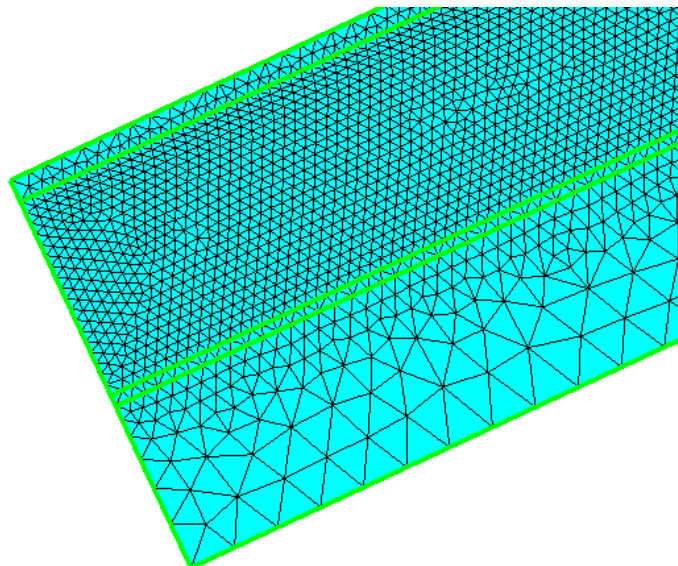
Figura 23 – Domínio utilizado para modelar o coletor.



Fonte: O autor, 2017.

A discretização foi feita utilizando elementos triangulares lineares a partir do tamanho mínimo e máximo do elemento. Definiu-se para a malha global tamanho mínimo de elemento de 4,0 mm e tamanho máximo de 8,0 mm. Além disso, aplicou-se controle de malha na região de escoamento com tamanho mínimo de elemento de 0,8 mm e tamanho máximo de 2,0 mm. O domínio foi discretizado com 47365 elementos, possuindo 22594 nós. Uma porção da malha pode ser visualizada na Figura 24.

Figura 24 – Malha de elementos triangulares lineares.



Fonte: O autor, 2017.

Após a geração da malha, esta é importada pelo Elmer, o qual conclui o pré-processamento e realiza o processamento numérico do modelo.

As propriedades dos materiais utilizados e as condições de contorno necessárias à simulação relacionadas à equação do calor aplicada aos materiais sólidos são: placa superior, placa absorvedora e isolante e acoplamento da equação de Navier-Stokes com a equação de calor para o escoamento de ar. As propriedades dos materiais utilizados na simulação estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedade dos materiais.

<b>Propriedade</b>	<b>Ar</b>	<b>Vidro</b>	<b>Aço</b>	<b>EPS</b>	<b>Lã de rocha</b>
<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1,2	2235,0	7850,0	9,5	32,0
<b>Condutividade térmica (W/mK)</b>	0,026	1,14	58,70	0,04	0,05
<b>Calor específico (J/kgK)</b>	1005,0	710,0	487,0	1200,0	750,0
<b>Viscosidade (N.s/m)</b>	$1,983 \cdot 10^{-5}$	n.a.*	n.a.*	n.a.*	n.a.*
<b>Emissividade</b>	n.a.*	0,90	0,95	n.a.*	n.a.*
<b>Absortividade</b>	n.a.*	0,06	0,95	n.a.*	n.a.*
<b>Transmitância</b>	n.a.*	0,87	n.a.*	n.a.*	n.a.*
<b>Temperatura de referência (K)</b>	298	298	400	298	298

\*n.a.: não aplicável.

Fonte: INCROPERA, 2011.

Para as condições iniciais, utilizou-se a temperatura média do ambiente no horário considerado. Esta média foi feita entre as temperaturas máximas e mínimas fornecidas pela Estação Meteorológica de Maringá. Para a condição inicial de velocidade de escoamento, considerou-se o fluido em repouso.

As condições de contorno, descritas na Tabela 8, envolvem os fenômenos físicos que atuam em cada porção do domínio. Foram consideradas as condições de escoamento e temperatura de entrada do fluido; o fluxo de calor fornecido pela irradiação solar nas placas absorvedora e transparente; as trocas térmicas de irradiação entre a placa superior e inferior devido aos fatores de forma; e as perdas térmicas por convecção para o ambiente devido à velocidade do vento. Estas condições foram avaliadas a partir dos dados obtidos no horário em que foi realizado o procedimento experimental. Além destas, foi utilizada condição de contorno de parede nas superfícies em contato com escoamento do fluido que estabelece velocidade nula de escoamento nos nós destas arestas.

Tabela 8 – Condições de contorno do modelo proposto.

<b>Condição de contorno: entrada de ar</b>	
<b>Velocidade normal</b>	Velocidade de fluxo imposta pelo ventilador.
<b>Velocidade tangencial</b>	0,0 m/s
<b>Temperatura</b>	Temperatura ambiente do horário analisado.
<b>Condição de contorno: superfície absorvedora (aço revestido com tinta preta)</b>	
<b>Fluxo de calor</b>	Porção transmitida pelo vidro da irradiação solar do horário analisado.
<b>Irradiação térmica</b>	Difusa, com consideração dos fatores de forma.
<b>Emissividade</b>	0,95
<b>Temperatura externa</b>	Temperatura ambiente do horário analisado.
<b>Velocidade do fluido</b>	Condição de parede.
<b>Condição de contorno: superfície superior transparente (vidro)</b>	
<b>Fluxo de calor</b>	Porção absorvida pelo vidro da irradiação solar do horário analisado.
<b>Irradiação térmica</b>	Difusa, com consideração dos fatores de forma.
<b>Emissividade</b>	0,9
<b>Temperatura externa</b>	Temperatura ambiente do horário analisado.
<b>Velocidade do fluido</b>	Condição de parede.
<b>Condição de contorno: perda de calor para o ambiente pela superfície superior</b>	
<b>Convecção forçada</b>	Coefficiente convectivo calculado para uma placa plana para a velocidade do vento do horário analisado.
<b>Temperatura externa</b>	Temperatura ambiente do horário analisado.
<b>Irradiação térmica</b>	Idealizada, sem consideração dos fatores de forma.
<b>Emissividade</b>	0,9
<b>Condição de contorno: perda de calor para o ambiente pela superfície inferior</b>	
<b>Convecção forçada</b>	Coefficiente convectivo calculado para uma placa plana para a velocidade do vento do horário analisado.
<b>Temperatura externa</b>	Temperatura ambiente do horário analisado.
<b>Irradiação térmica</b>	Não considerada. Superfície abaixo do isolante térmico.

Fonte: O autor, 2017.

### 3.3.2 Processamento

A simulação foi executada em regime transiente a partir das condições iniciais até o momento em que o coletor solar atinge a operação em regime permanente. Durante o período transiente, a distribuição de temperatura no equipamento varia a cada instante de tempo. A partir do momento em que a temperatura permanece constante, considera-se que o regime permanente foi atingido.

Neste contexto, o solucionador do Elmer foi configurado para simular o modelo da seguinte maneira: 10 intervalos de tempo de 5 s, 248 intervalos de 25 s e 201 intervalos de 50 s. No modelo real, considera-se que o coletor atinja o regime quase estático ou quase permanente a cada variação de radiação, de modo que se espera uma boa aproximação dos resultados. A mesma consideração é feita por Ong (1995) em sua análise.

Para o domínio constituído por materiais sólidos, foi estabelecida a solução da equação de calor (Equação 17) utilizando tolerância de  $1.10^{-10}$  para sistemas lineares e tolerância de  $1.10^{-7}$  para sistemas não lineares. O método iterativo BiCGStab apresentou boa convergência dos resultados.

Para o domínio constituído pelo escoamento do ar, foi estabelecida a solução das equações de Navier-Stokes (Equações 26 e 27) em conjunto com a equação de calor (Equação 17). Utilizou-se a mesma tolerância mencionada anteriormente, sendo que, novamente, o método iterativo BiCGStab apresentou boa convergência dos resultados.

### 3.3.3 Pós-processamento

O pós-processamento foi realizado nos *softwares* livres e de código aberto Paraview e Scidavis. O Paraview foi utilizado para a visualização do campo de temperatura e velocidade no interior do coletor, bem como para exportar dados numéricos em regiões de interesse, como na superfície da placa absorvedora, na superfície de vidro, na linha média do escoamento de ar e na linha que liga os sensores de temperatura. Por sua vez, o Scidavis foi utilizado para traçar curvas de resultados para variáveis de interesse.

Os resultados do escoamento de ar foram analisados para a linha média do domínio e para a linha que une os sensores de acordo com o posicionamento destes em cada experimento.



Na primeira etapa experimental, os sensores foram fixados em um borne e o sistema de aquisição estava no interior do canal de escoamento, como é demonstrado na Figura 15-b. Devido a isso, todos os sensores estão localizados a uma distância de 10,0 mm da placa de vidro, o que significa dizer que estão localizados a 26,0 mm da placa absorvedora.

Tomando como referência a superfície superior da placa absorvedora, foi possível traçar linhas ao longo do comprimento do coletor das quais foram extraídos os resultados. Sendo assim, as posições dos principais elementos do equipamento estão relacionadas na Tabela 9.

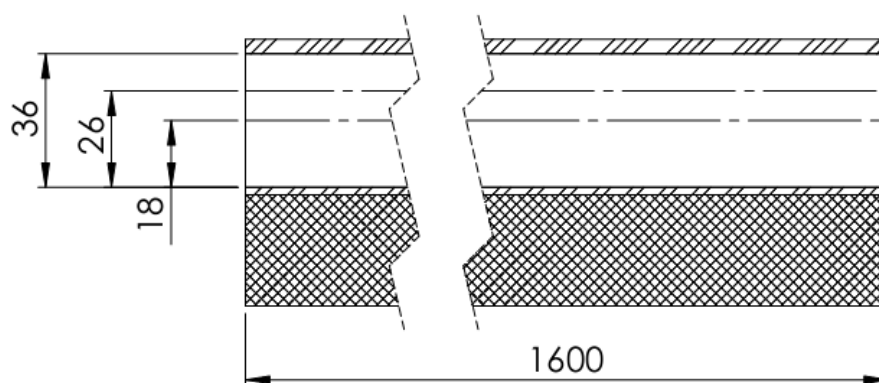
Tabela 9 – Posição de extração dos resultados no primeiro experimento.

<b>Elemento</b>	<b>Posição</b>
<b>Placa absorvedora</b>	0,0 mm
<b>Linha média do escoamento</b>	18,0 mm
<b>Linha que une os sensores LM-35</b>	26,0 mm
<b>Placa superior (vidro)</b>	36,0 mm

Fonte: O autor, 2017.

A Figura 25 exibe as linhas ao longo do comprimento do coletor das quais foram extraídas os resultados para análise do experimento em área residencial.

Figura 25 – Linhas de análise de resultado para experimento em residência.



Fonte: O autor, 2017.

Na segunda etapa experimental, apenas, o encapsulamento do sensor estava no interior do equipamento, como pode ser visto na Figura 16-c. Devido a isso, todos os sensores estão localizados a uma distância de 5,0 mm da placa de vidro, o que significa dizer que estão localizados a 31,0 mm da placa absorvedora.

Da mesma forma, foi estabelecida como referência a superfície superior da placa absorvedora. Sendo assim, as posições dos principais elementos do equipamento estão relacionadas na Tabela 10.

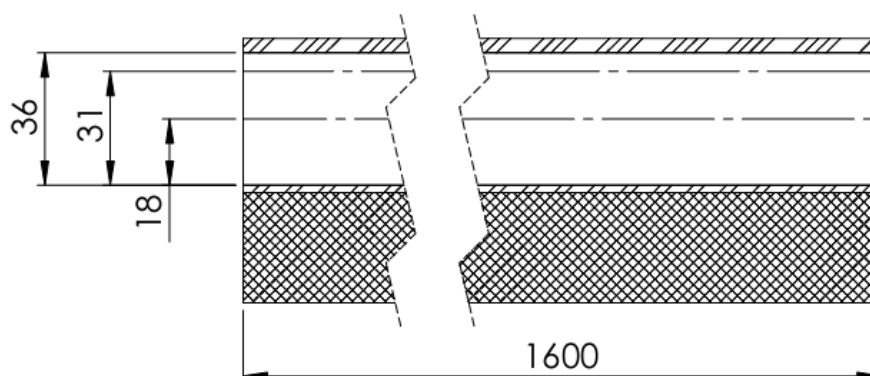
Tabela 10 – Posição de extração dos resultados no segundo experimento.

<b>Elemento</b>	<b>Posição</b>
<b>Placa absorvedora</b>	0,0 mm
<b>Linha média do escoamento</b>	18,0 mm
<b>Linha que une os sensores LM-35</b>	31,0 mm
<b>Placa superior (vidro)</b>	36,0 mm

Fonte: O autor, 2017.

A Figura 26 exibe as linhas ao longo do comprimento do coletor das quais foram extraídos os resultados para análise do experimento na estação climatológica.

Figura 26 – Linhas de análise de resultado para experimento em estação meteorológica.



Fonte: O autor, 2017.

### 3.4 Análise da influência da vazão de ar na eficiência

Para avaliar o desempenho do coletor, foi utilizado o modelo computacional descrito nas seções anteriores. Como o intuito é verificar o comportamento do campo de temperatura com a vazão volumétrica de ar, fixou-se os valores das demais condições de contorno para 5 estudos com vazões crescentes. Isso foi repetido para 3 valores de irradiação solar, resultando em 15 simulações. Os valores das principais variáveis estão relacionados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros da análise de eficiência.

<b>Simul.</b>	<b>Vazão (l/s)</b>	<b>Vel. no canal (m/s)</b>	<b>Irrad. solar (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Irrad. absorvida na placa inferior (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Irrad. absorvida na placa superior (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Vel. do vento (m/s)</b>	<b>Temp. ambiente (K)</b>
<b>01a</b>	0,5	0,021	500	413,25	30,0	1,0	298
<b>02a</b>	0,75	0,032	500	413,25	30,0	1,0	298
<b>03a</b>	1,00	0,042	500	413,25	30,0	1,0	298
<b>04a</b>	2,5	0,105	500	413,25	30,0	1,0	298
<b>05a</b>	5,0	0,210	500	413,25	30,0	1,0	298
<b>01b</b>	0,5	0,021	700	578,55	42,0	1,0	298
<b>02b</b>	0,75	0,032	700	578,55	42,0	1,0	298
<b>03b</b>	1,00	0,042	700	578,55	42,0	1,0	298
<b>04b</b>	2,5	0,105	700	578,55	42,0	1,0	298
<b>05b</b>	5,0	0,210	700	578,55	42,0	1,0	298
<b>01c</b>	0,5	0,021	900	743,85	54,0	1,0	298
<b>02c</b>	0,75	0,032	900	743,85	54,0	1,0	298
<b>03c</b>	1,00	0,042	900	743,85	54,0	1,0	298
<b>04c</b>	2,5	0,105	900	743,85	54,0	1,0	298
<b>05c</b>	5,0	0,210	900	743,85	54,0	1,0	298

Fonte: O autor, 2017.

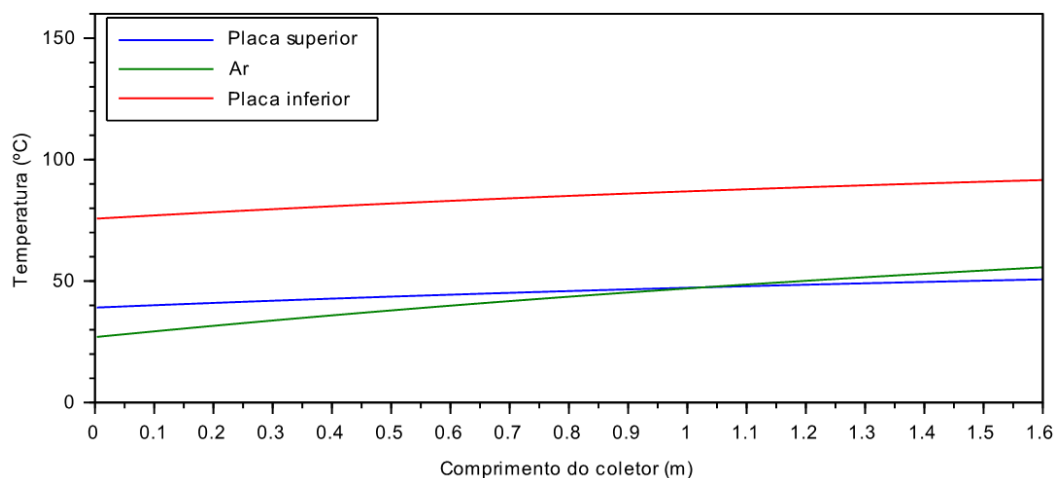
A temperatura de saída do ar foi obtida da média da distribuição de temperatura da seção transversal do coletor solar. A eficiência foi calculada considerando a diferença desta temperatura com a temperatura de admissão do fluido utilizando a Equação 16.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No processo de dimensionamento do modelo experimental foram utilizados os parâmetros da Tabela 2 e vazão mássica de ar de 0,01 kg/s na análise de Ong (1995).

Os perfis de temperatura da placa inferior (placa absorvedora), da placa superior (placa de vidro) e do ar ao longo do comprimento do coletor estão retratados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Perfil de temperatura para condições ideais.



Fonte: O autor, 2016.

A eficiência global do coletor para as condições ideais, de acordo com a Equação 16, é de aproximadamente 35%. As dimensões do projeto são justificadas pela obtenção de uma eficiência adequada e temperatura na saída de ar de aproximadamente 55° C, suficiente para algumas aplicações.

### 4.1 Vazão experimental

Após a instalação do ventilador, mediu-se a velocidade de saída do ar para cada uma das saídas, obtendo os valores de vazão volumétrica indicados na Tabela 12 para 50% e 100% da potência do ventilador.

Tabela 12 – Velocidade de ar no canal do coletor solar.

Potência do ventilador	Velocidade do ar na saída (m/s)	Vazão (l/s)	Velocidade estimada no canal do coletor (m/s)
50 %	1,4	0,53	0,022 m/s
100 %	2,8	1,06	0,045 m/s

Fonte: O autor, 2016.

## 4.2 Operação para área residencial

No dia 02 de janeiro de 2017, o céu estava com poucas nuvens. Os dados obtidos por meio da estação meteorológica estão na Tabela 13.

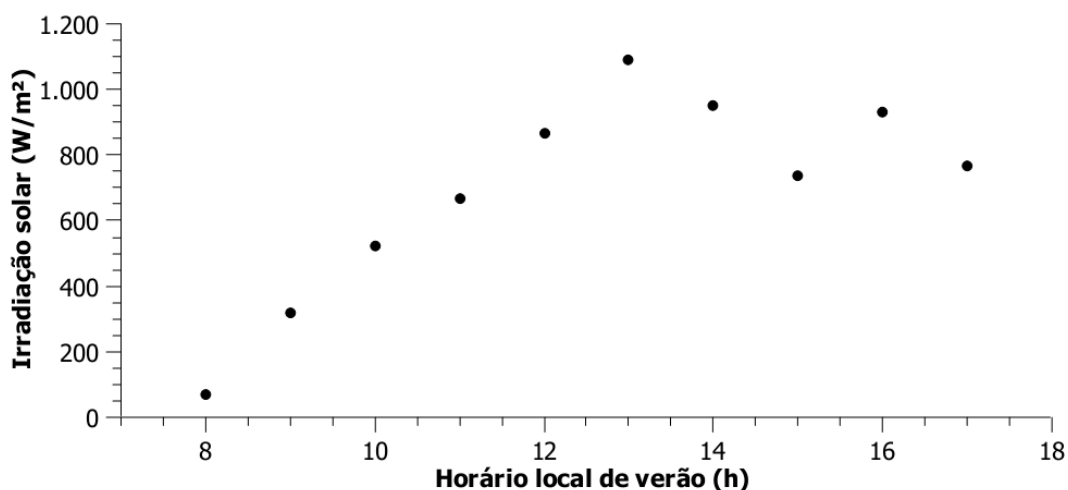
Tabela 13 – Dados climatológicos 02/01/2017.

Horário (UTC)	Horário local de verão (h)	Temp. mín. (°C)	Temp. máx. (°C)	Vel. do vento (m/s)	Direção (°)	Raj. de vento (m/s)	Irradiação solar (W/m <sup>2</sup> )
11	9	21,0	23,5	0,6	154	2,6	317,5
12	10	23,0	25,0	1,4	323	2,6	525,28
13	11	24,2	26,2	1,4	306	3,0	666,11
14	12	25,4	26,1	2,4	229	5,0	865,83
15	13	26,0	28,3	2,5	239	6,5	1090,00
16	14	27,1	27,8	2,3	244	6,6	952,78
17	15	27,2	27,6	2,4	198	6,1	735,83
18	16	27,6	30,3	2,5	217	5,3	933,33
19	17	28,8	30,2	1,9	197	5,4	764,44

Fonte: INMET, 2017.

O Gráfico 2 representa a irradiação incidente na região de Maringá no mesmo dia.

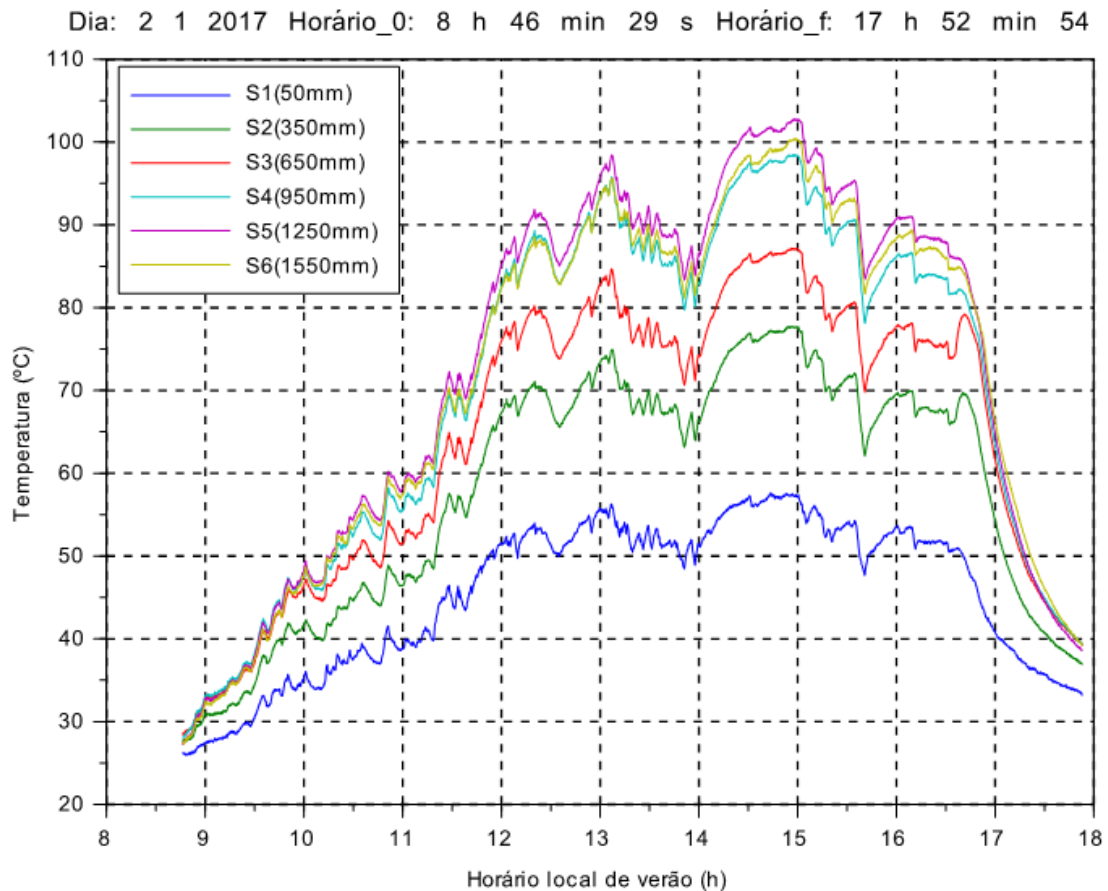
Gráfico 2 – Irradiação solar no dia 02/01/2017.



Fonte: INMET, 2017.

O Gráfico 3 é o resultado do monitoramento da temperatura. É importante destacar que neste dia o coletor operou com a vazão de 0,53 l/s.

Gráfico 3 – Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 02/01/2017.



Fonte: O autor, 2017.

Analisando o Gráfico 3, podemos observar que o comportamento da temperatura do ar do coletor varia com a irradiação recebida pela superfície do coletor solar. Os períodos de resfriamentos abruptos no gráfico são devido a uma queda na irradiação recebida pelo coletor. Estes períodos são evidenciados nos intervalos de 12h:10min e 12h:30min, 13h e 14h, 15h:30min e 16h e são ocasionados pela passagem de nuvens que encobrem o Sol. Após 16h:30min, notou-se um resfriamento contínuo de todos os sensores que ocorreu devido às construções servirem de anteparo ao equipamento, provocando sombra sobre ele.

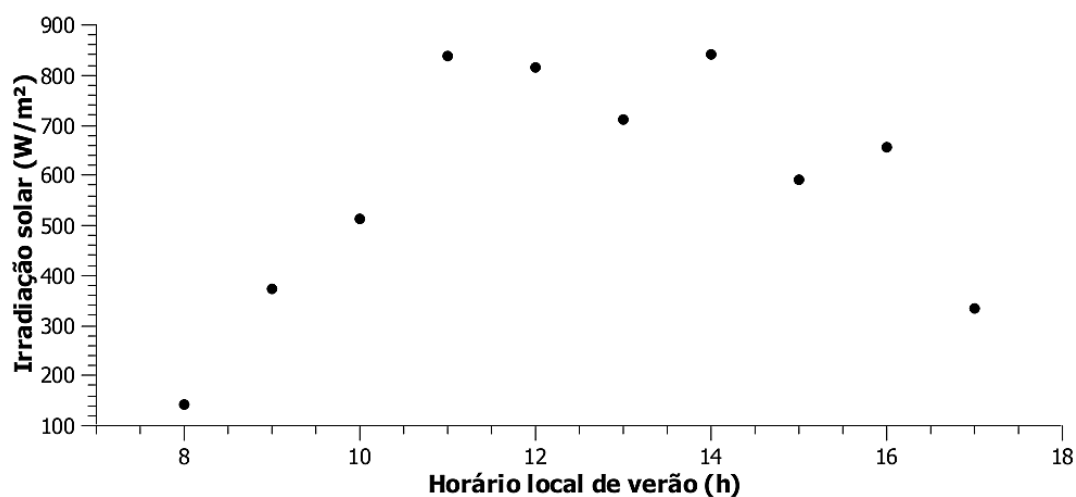
No dia 03 de janeiro de 2017, houve maior incidência de nuvens que no dia anterior. Os dados obtidos por meio da estação meteorológica estão na Tabela 14. O Gráfico 4 representa a irradiação incidente na região de Maringá no mesmo dia.

Tabela 14 – Dados climatológicos 03/01/2017.

Horário (UTC)	Horário local de verão (h)	Temp. mín. (°C)	Temp. máx. (°C)	Vel. do vento (m/s)	Direção (°)	Raj. de vento (m/s)	Irradiação solar (W/m <sup>2</sup> )
11	9	24,2	25,8	2,4	60	6,1	371,67
12	10	25,3	26,3	3,3	70	5,9	511,94
13	11	26,3	27,9	2,9	36	7,6	837,78
14	12	27,3	28,0	3,1	44	8,3	814,72
15	13	27,7	29,0	3,1	35	7,3	710,56
16	14	28,9	29,1	3,1	19	9,6	840,28
17	15	26,0	29,6	1,5	27	7,0	591,11
18	16	29,2	30,1	2,5	358	6,3	657,50
19	17	25,6	25,6	4,6	29	11,8	334,44

Fonte: INMET, 2017.

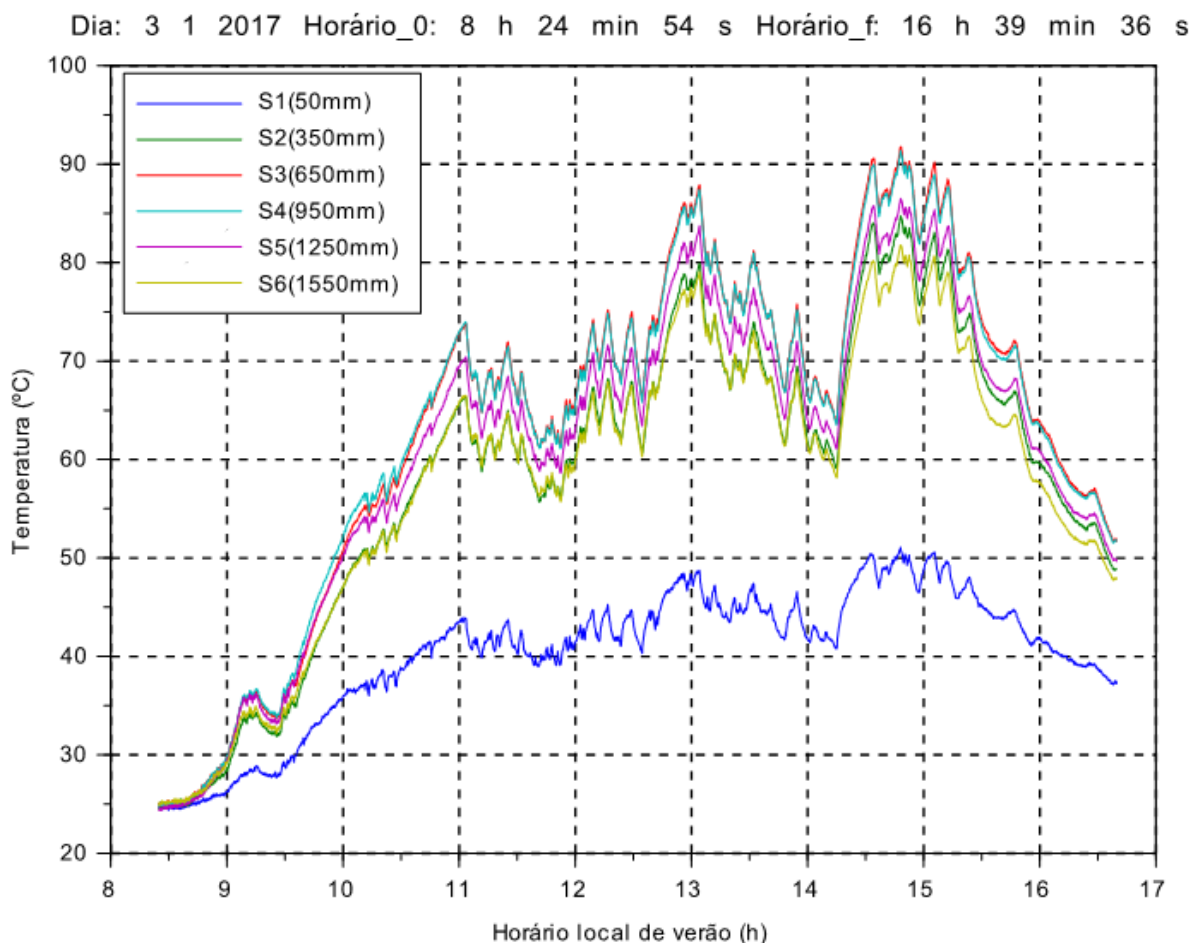
Gráfico 4 – Irradiação solar no dia 03/01/2017.



Fonte: INMET, 2017.

As temperaturas adquiridas utilizando a vazão de 1,06 l/s no dia 03 de janeiro estão representadas no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 03/01/2017.



Fonte: O autor, 2017.

Novamente, é possível observar os períodos de resfriamentos abruptos no gráfico devido a uma queda na irradiação. Esses períodos são evidenciados nos intervalos de 11h:30min e 12h, 13h e 14h:20min, ocasionados pela passagem de nuvens que encobrem o Sol. O monitoramento foi afetado devido à presença de nuvens de chuva após 15h:30min.

#### 4.3 Operação em estação meteorológica

Os dados obtidos por intermédio da estação meteorológica para o dia 05 de agosto 2017 estão relacionados na Tabela 15. Nesta data, o céu permaneceu limpo durante a maior parte do tempo. Eventualmente, houve incidência de nuvens de pequenas extensões.



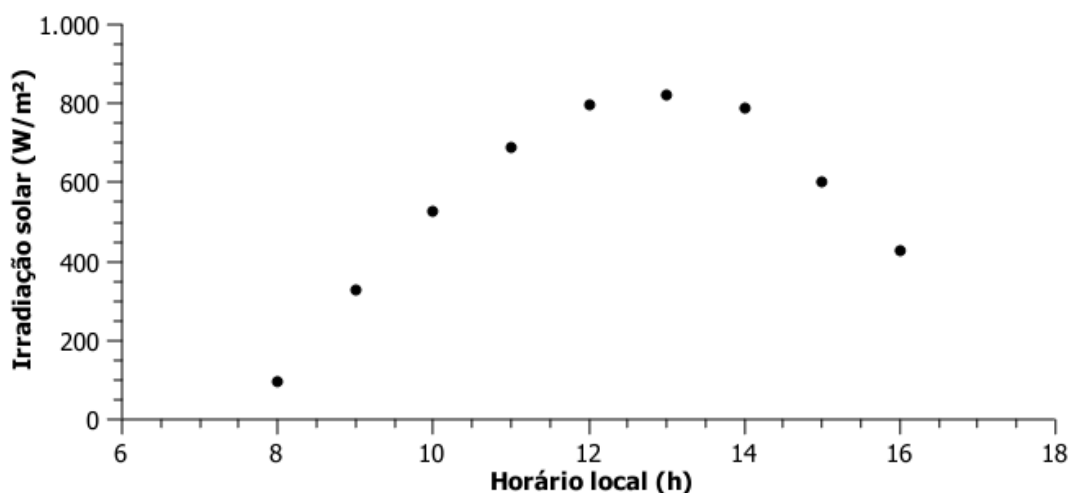
Tabela 15 – Dados climatológicos 05/08/2017.

Horário (UTC)	Horário local (h)	Temp. mín. (°C)	Temp. máx. (°C)	Vel. do vento (m/s)	Direção (°)	Raj. de vento (m/s)	Irradiação solar (W/m <sup>2</sup> )
11	8	14,2	14,3	2,9	100	6,4	93,61
12	9	16,4	16,4	2,9	87	6,9	327,22
13	10	18,3	18,3	5,7	83	10,9	525,83
14	11	19,9	20,0	3,9	75	10,9	687,22
15	12	21,3	21,4	4,3	79	11,1	797,50
16	13	22,2	22,4	4,2	71	10,8	821,94
17	14	22,7	23,1	3,5	60	9,6	786,39
18	15	22,5	23,4	3,5	68	8,4	602,22
19	16	21,9	23,7	3,1	76	7,7	426,39

Fonte: INMET, 2017.

O Gráfico 6 representa a irradiação incidente na região de Maringá no mesmo dia.

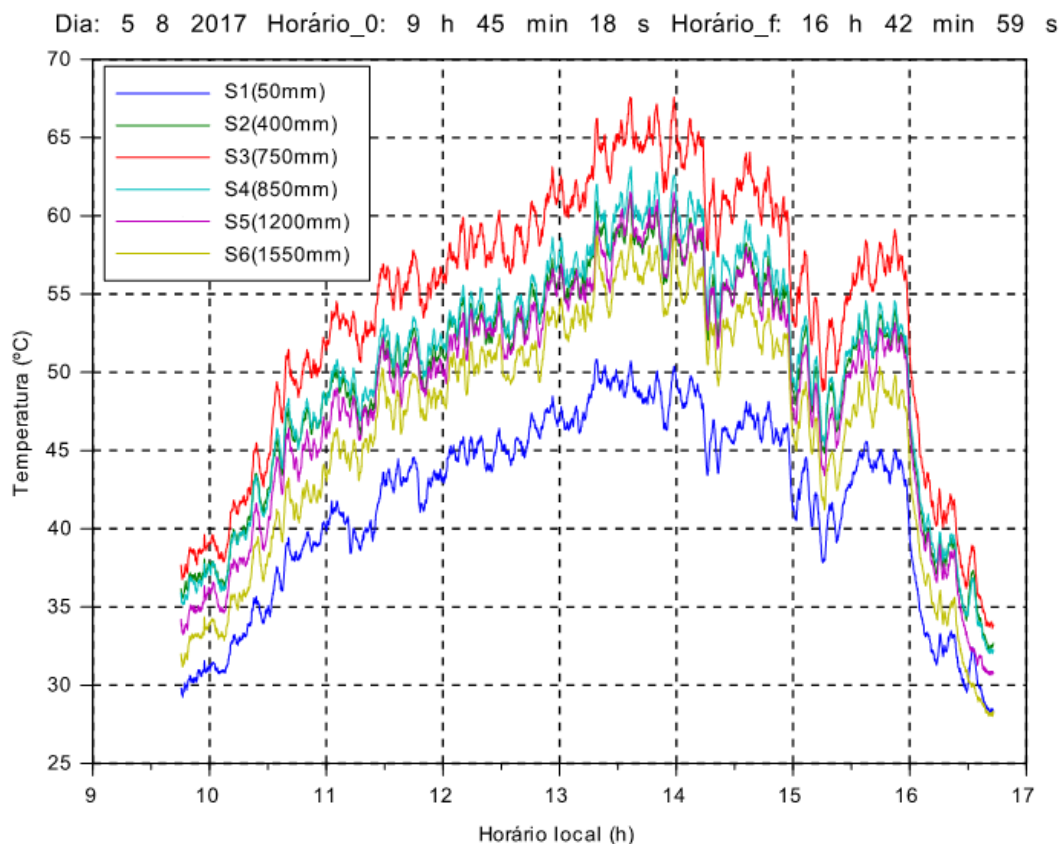
Gráfico 6 – Irradiação solar no dia 05/08/2017.



Fonte: INMET, 2017.

As temperaturas adquiridas utilizando a vazão de 0,53 l/s no dia 05 de agosto estão representadas no Gráfico 7. Analisando-o, nota-se que, durante a maior parte do tempo, o aumento da irradiação ou sua queda são suaves. Isso ocorre devido a não haver anteparo que altere a recepção de irradiação solar. Ainda assim, a queda abrupta com aumento subsequente de temperatura entre 15h e 15h:30min foi causada pela passagem de nuvens.

Gráfico 7 – Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 05/08/2017.



Fonte: O autor, 2017.

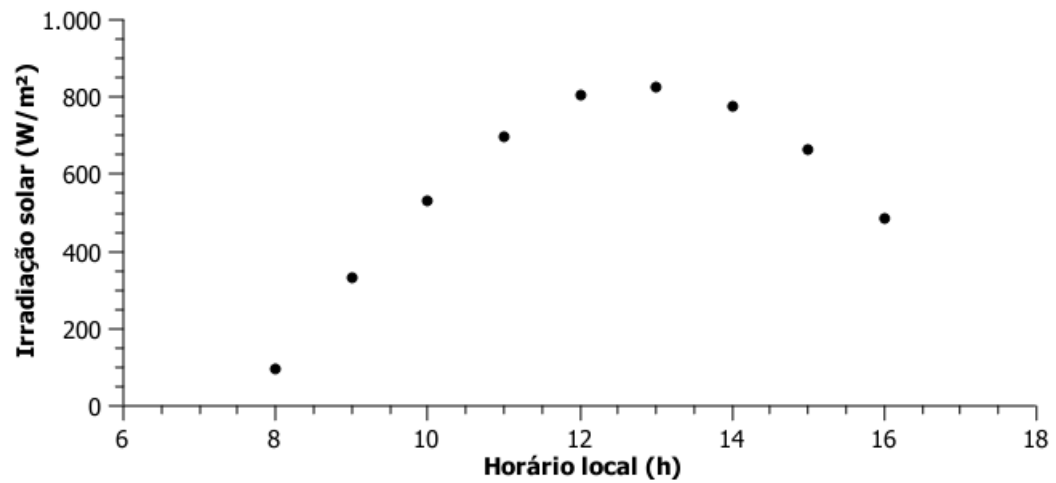
No dia 06 de agosto de 2017, o céu continuou com pouca incidência de nuvens. Os dados obtidos por meio da estação meteorológica estão na Tabela 16. O Gráfico 8 representa a irradiação incidente na região de Maringá para aquele dia.

Tabela 16 – Dados climatológicos 06/08/2017.

Horário (UTC)	Horário local (h)	Temp. mín. (°C)	Temp. máx. (°C)	Vel. do vento (m/s)	Direção (°)	Raj. de vento (m/s)	Irradiação solar (W/m²)
11	8	12,2	13,5	4,9	94	9,6	96,67
12	9	13,5	15,5	4,9	96	8,5	333,89
13	10	15,5	18,1	4,1	88	8,9	530,83
14	11	18,0	20,3	3,8	83	9,2	696,67
15	12	19,7	21,5	3,6	83	8,1	803,06
16	13	21,2	22,4	2,7	11	8,1	826,11
17	14	22,4	23,3	2,3	54	7,0	776,11
18	15	23,2	23,4	3,0	33	7,1	663,89
19	16	23,4	24,0	2,3	31	7,4	486,67

Fonte: INMET, 2017.

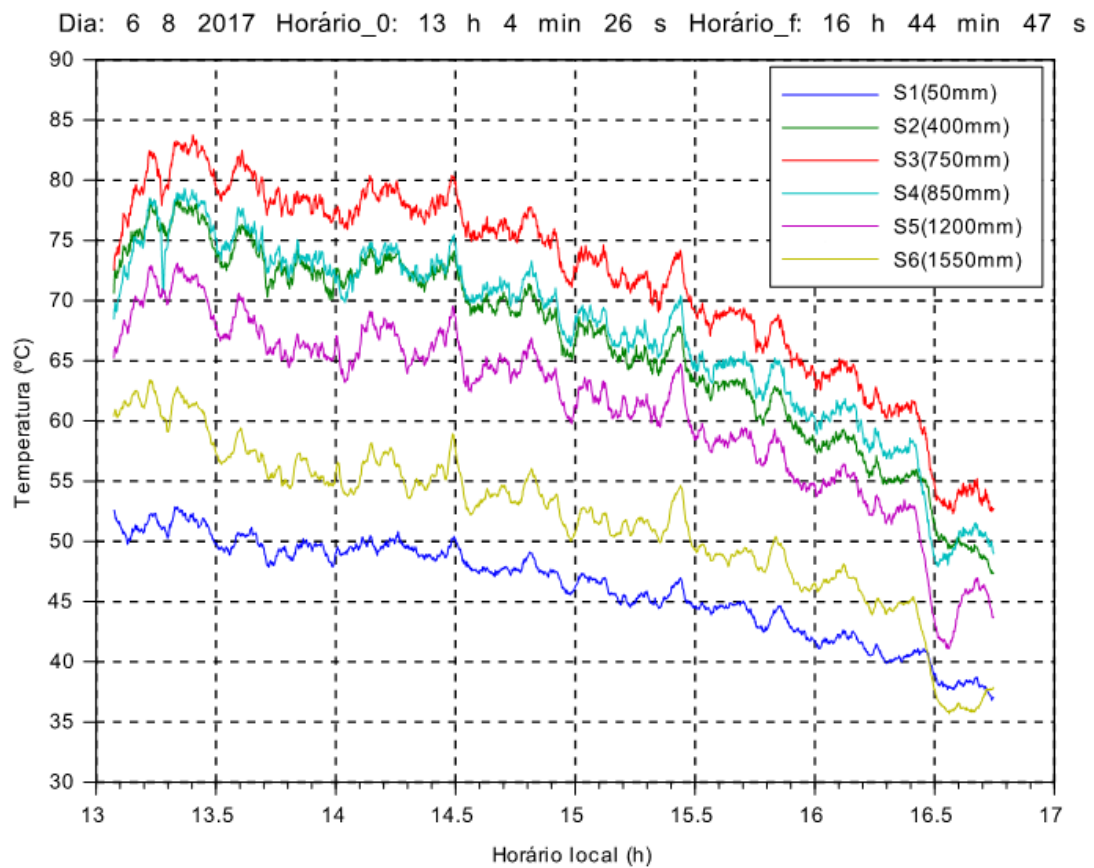
Gráfico 8- Irradiação solar no dia 06/08/2017.



Fonte: INMET, 2017.

As temperaturas adquiridas utilizando a vazão de 1,06 l/s no dia 06 de agosto estão representadas no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Monitoramento da temperatura no coletor durante o dia 06/08/2017.



Fonte: O autor, 2017.

Neste dia, o coletor solar foi operado a partir das 13h do horário local. O objetivo foi verificar o tempo necessário para o equipamento atingir o regime permanente de operação. Isso pode ser observado no período abrupto de aquecimento inicial que durou cerca de 600 s. O restante da operação ocorreu de maneira normal, havendo incidência de nuvens apenas depois de 16h:30 min do horário local.

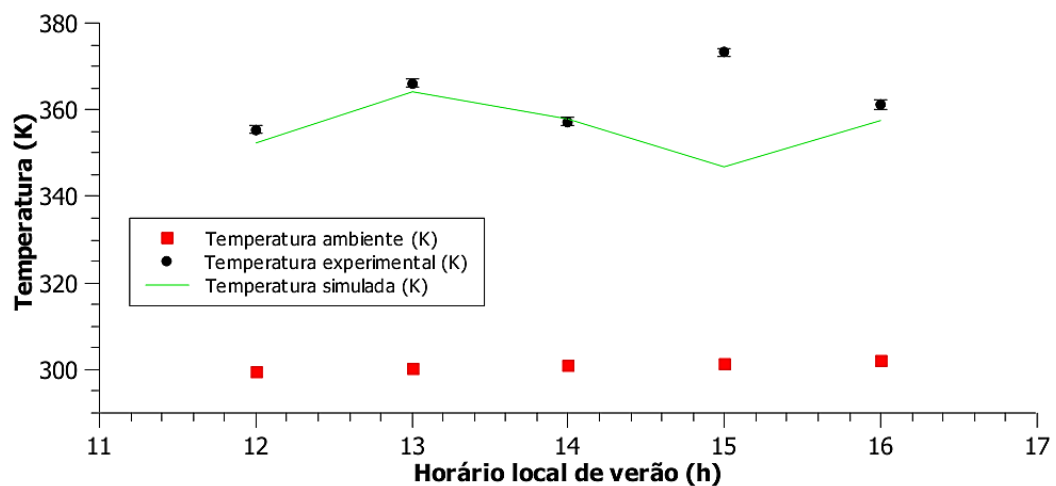
#### 4.4 Validação do modelo computacional

As soluções obtidas pelo pacote Elmer utilizaram as condições de operação de cinco horários consecutivos (14 a 18 UTC) dos dias 02 de janeiro e 05 de agosto de 2017, a fim de comparações com os resultados experimentais.

De acordo com o Gráfico 2, houve incidência de nuvens na estação meteorológica entre o período de 14 e 15h, evidenciado pelo aumento da intensidade de irradiação solar em um horário posterior, comportamento que não ocorreria em condições de céu limpo.

Os dados de temperatura experimental e simulada no sensor mais próximo da saída, bem como a temperatura ambiente para o mesmo dia, estão exibidos no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Dados experimentais e simulados para o dia 02/01/2017.



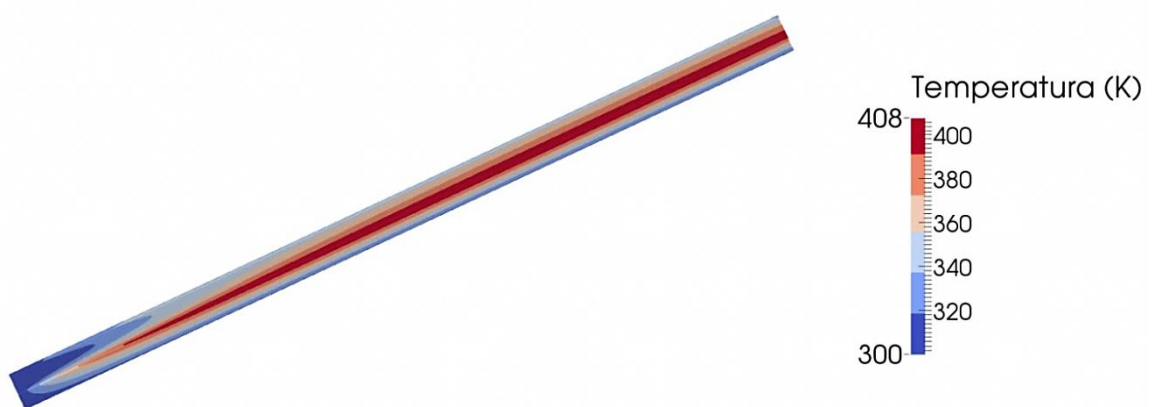
Fonte: O autor, 2017.

Nota-se uma boa concordância entre os resultados do modelo e os experimentais. A divergência que ocorre às 15 h é devido à presença de uma nuvem, atuando como anteparo, na estação meteorológica, mas sem extensão para diminuir o recebimento de irradiação na área residencial na qual o experimento foi realizado. O comportamento simulado segue o

comportamento da intensidade da irradiação, pois esta é uma condição de contorno do modelo computacional. Uma vez que a fonte de dados de irradiação encontra-se distante do coletor solar, o procedimento está sujeito a esse tipo de erro.

Verificada a concordância entre os resultados, foi analisado o campo de temperatura no interior do coletor para cada simulação. A distribuição de temperatura no coletor solar para as condições climáticas do dia 02/01/2017 às 13h (15 UTC) está na Figura 27.

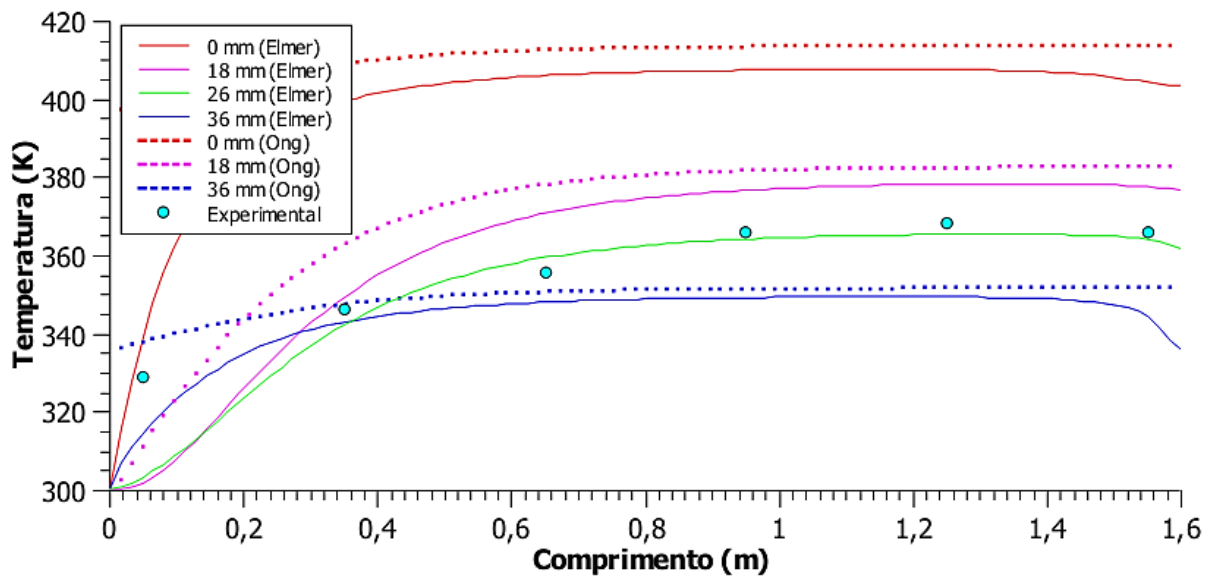
Figura 27 – Distribuição de temperatura no coletor solar em 02/01/2017-15 UTC.



Fonte: O autor, 2017.

O perfil de temperatura ao longo do comprimento do coletor solar é demonstrado no Gráfico 11. As curvas contínuas representam os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, as curvas tracejadas são resultados provenientes do método de energia proposto por Ong (1995) e os resultados pontuais são os dados experimentais registrados exatamente às 13h do dia 02/01/2017.

Gráfico 11 – Perfil de temperatura: 15 UTC – 02/01/2017.



Fonte: O autor, 2017.

Analisando as curvas obtidas, nota-se a proximidade dos resultados obtidos com o método de Ong (1995), com o MEF e experimentalmente. Os dados experimentais devem estar próximos à curva que descreve a posição transversal de 26 mm, conforme Figura 25. Isso ocorre a partir do segundo sensor, posicionado em 0,35 m.

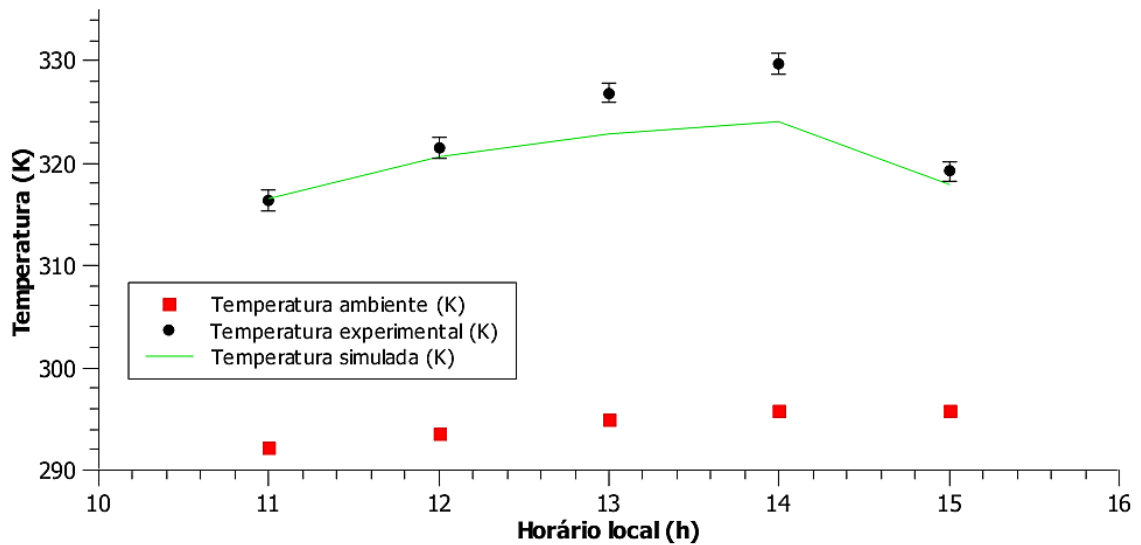
A diferença que ocorre no primeiro sensor justifica-se pelo escoamento da região de entrada do coletor experimental não estar desenvolvido nesta posição. Outra região de importância está entre o terceiro e o quarto sensor, posicionados em 0,65 m e 0,95 m, respectivamente, onde há uma pequena ondulação na chapa absorvedora inerente à fabricação e montagem do equipamento.

Devido à convergência dos resultados entre três metodologias distintas, conclui-se que o modelo proposto para simulação computacional é válido na predição do comportamento da temperatura no escoamento e predição de valores condizentes com realidade para a temperatura atingida pelo ar.

Com intuito de respaldar as conclusões anteriores, foram simuladas as condições de operação para o experimento realizado na estação meteorológica. Os dados de temperatura experimental e simulada no sensor mais próximo da saída, bem como a temperatura ambiente para o mesmo dia, estão exibidos no Gráfico 12.

Novamente, notou-se uma boa concordância entre os resultados do modelo MEF e os experimentais. O comportamento simulado e o experimental são idênticos e os valores obtidos estão próximos.

Gráfico 12 – Dados experimentais e simulados para o dia 05/08/2017.

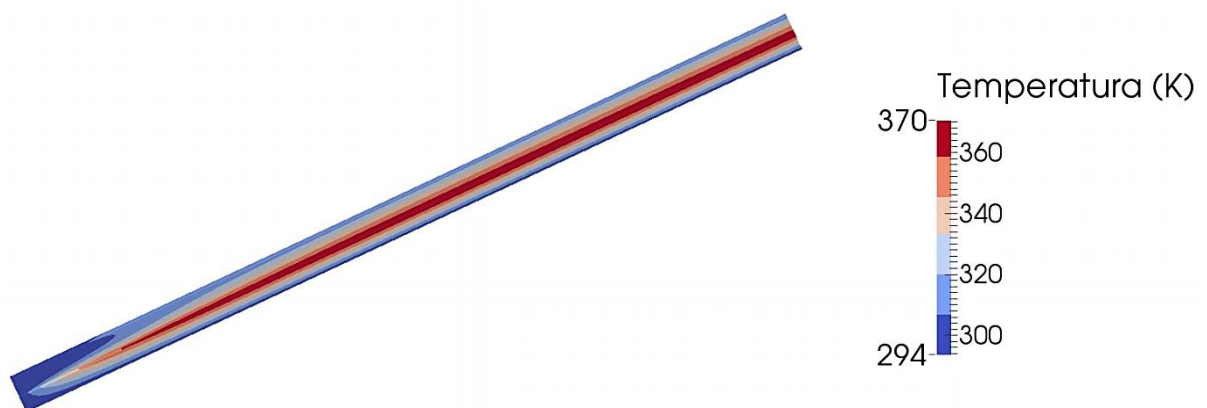


Fonte: O autor, 2017.

O aumento da diferença entre a temperatura simulada e experimental entre 13 e 14h tem uma explicação plausível na direção do vento. A condição de contorno utilizada no modelo do Elmer é o coeficiente convectivo, para as superfícies superior e inferior, estimado por meio do escoamento paralelo do ar em uma superfície plana. Nos horários citados, o vento mudou de direção, conforme Tabela 16, o que pode fundamentar a hipótese de uma menor perda de calor ao ambiente para experimento.

Assim como na análise precedente, o campo de temperatura no interior do coletor foi avaliado em cada horário. A distribuição de temperatura no coletor solar para as condições climáticas do dia 05/08/2017, às 12h (15 UTC), é representada na Figura 28.

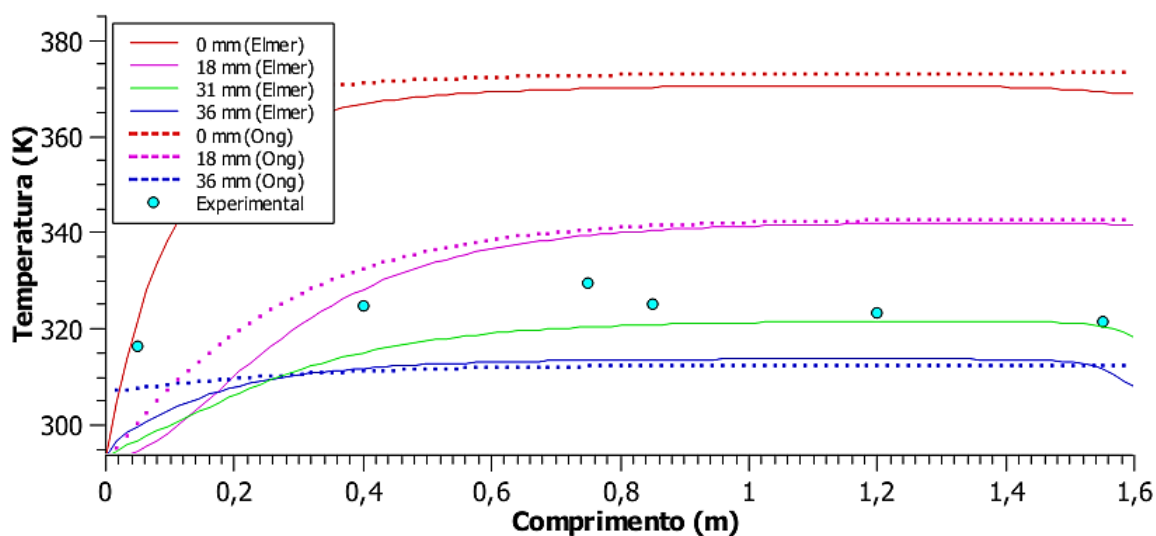
Figura 28 – Distribuição de temperatura no coletor solar em 05/08/2017-15 UTC.



Fonte: O autor, 2017.

O perfil de temperatura ao longo do comprimento do coletor solar está descrito no Gráfico 13. Assim como anteriormente, as curvas contínuas são os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, as curvas tracejadas são resultados provenientes do método de Ong (1995) e os resultados pontuais são os dados experimentais registrados exatamente às 12h do dia 05/08/2017.

Gráfico 13 – Perfil de temperatura: 15 UTC – 05/08/2017.



Fonte: O autor, 2017.

Novamente, os dados experimentais devem estar próximos à curva que descreve a posição transversal de 31 mm, conforme Figura 26. Isso ocorre a partir do terceiro sensor posicionado em 0,75 m.

Observou-se uma maior divergência experimental do que aquela obtida no Gráfico 11, como consequência da maneira em que os sensores foram colocados em contato com escoamento de ar, principalmente na entrada de ar, já que no modelo experimental o ar necessita escoar por determinado comprimento até tornar-se permanente. Entretanto, as medidas convergem ao longo do comprimento e estão próximas às reais nos últimos sensores.

A modificação de localização dos sensores permitiu identificar a influência da ondulação, presente na chapa absorvedora, nas temperaturas medidas experimentalmente, como está claro nos pontos centrais do Gráfico 13.

Devido à convergência dos resultados entre três metodologias distintas, (método de Ong (1995), simulação computacional e dados experimentais), constatou-se a validade do modelo proposto em elementos finitos para análise de coletores solares.



Os demais horários simulados dos dias selecionados para a validação, 02/01/2017 e 05/08/2017, estão no Apêndice A.

O dia 03/01/2017 apresentou vários períodos de queda abrupta de incidência de radiação solar causada por nuvens. Assim, estes dados foram descartados para a realização das simulações. Os resfriamentos interferem no regime quase estático de operação, sendo não ideal para comparações de resultados. Já o dia 06/01/2017 não foi simulado, pois foi o experimento complementar ao realizado no dia 03 de janeiro de 2017.

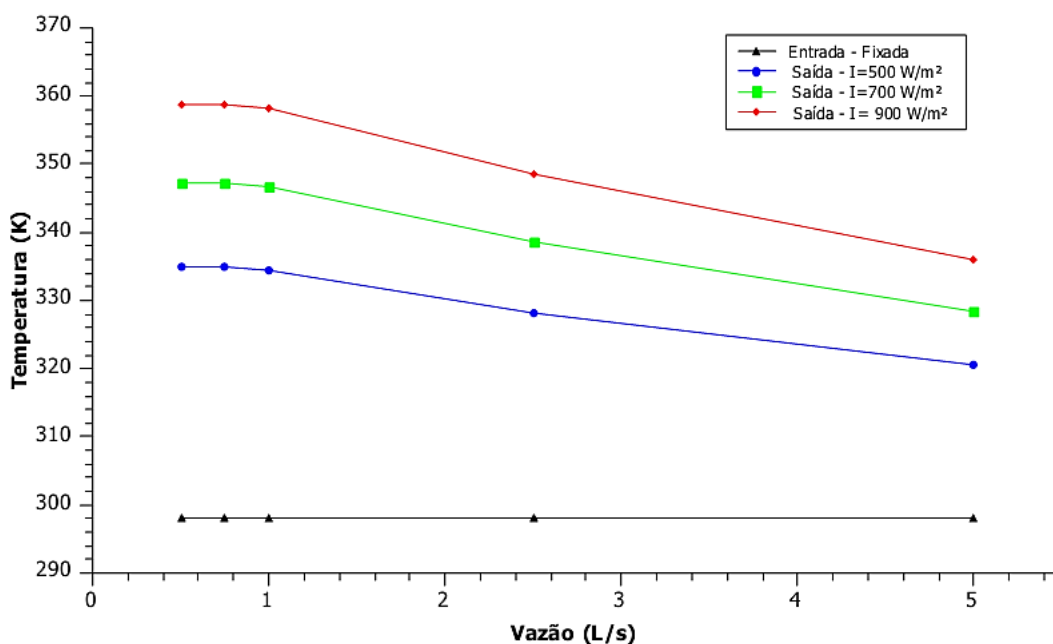
#### 4.5 Eficiência térmica e otimização da geometria

A partir de simulações utilizando o modelo em elementos finitos proposto foi possível avaliar a influência de algumas variáveis, como a vazão e o comprimento do coletor solar na temperatura de aquecimento e eficiência, obtendo resultados importantes para o projeto deste tipo de aquecedor.

##### 4.5.1 Relação entre vazão e eficiência

A influência da vazão na temperatura de saída foi avaliada para três valores de intensidade de radiação solar, apresentando o mesmo comportamento conforme o Gráfico 14.

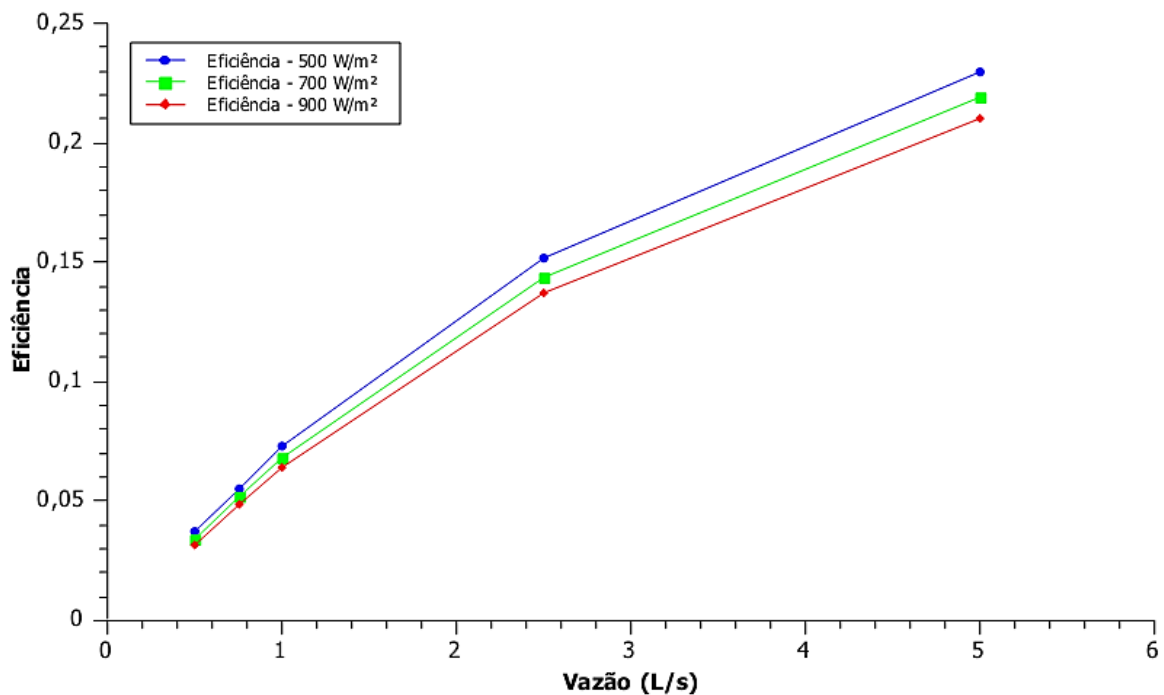
Gráfico 14 – Influência da vazão de ar na temperatura de saída do ar.



Fonte: O autor, 2017.

O aumento da vazão de ar provoca a diminuição da temperatura de saída devido ao maior fluxo mássico através do coletor. Essa relação permite obter a temperatura adequada para determinada aplicação a partir do controle da velocidade do ar fornecida pelo soprador.

Gráfico 15 – Influência da vazão de ar na eficiência global do coletor solar.



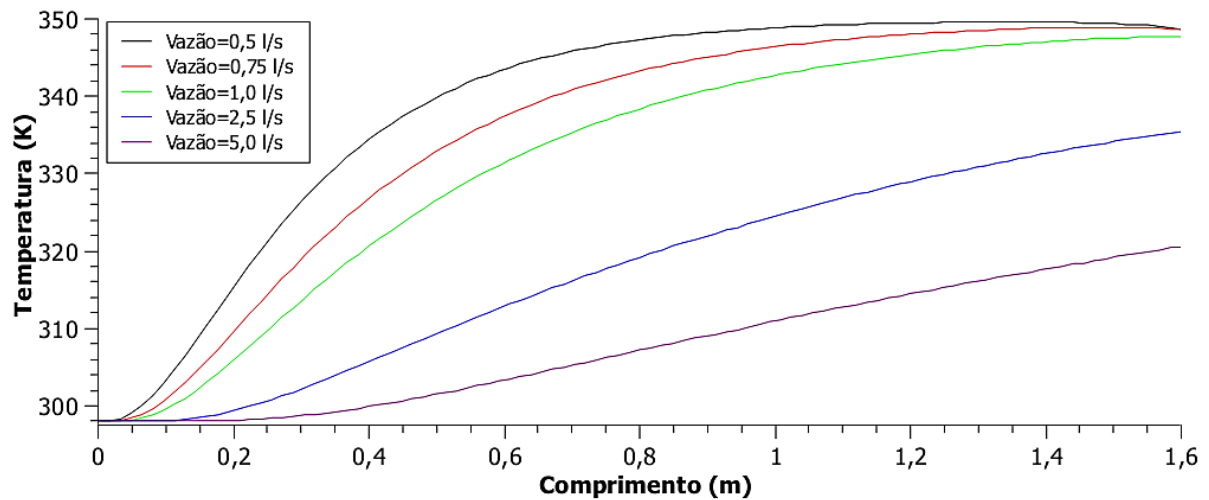
Fonte: O autor, 2017.

A troca de calor entre a placa absorvedora e o ar ocorre devido à convecção térmica. O aumento da vazão de ar é responsável pelo aumento da velocidade do escoamento, consequentemente do coeficiente convectivo. Sendo assim, o aumento da vazão permite ao ar receber uma quantidade maior de calor ao atravessar o volume de controle aumentando a eficiência térmica do coletor, conforme o Gráfico 15.

#### 4.5.2 Comprimento ideal

O aquecimento do ar para coletores solares de placas planas ocorre de tal forma que é possível prever um comprimento ótimo para cada condição de operação. Os perfis de temperatura na linha média do domínio do escoamento de ar para as vazões de 0,5 l/s, 0,75 l/s, 1,0 l/s, 2,5 l/s e 5,0 l/s, para intensidade de irradiação solar de 700 W/m², estão representados no Gráfico 16.

Gráfico 16 – Perfil de temperatura do ar ao longo do comprimento do coletor.

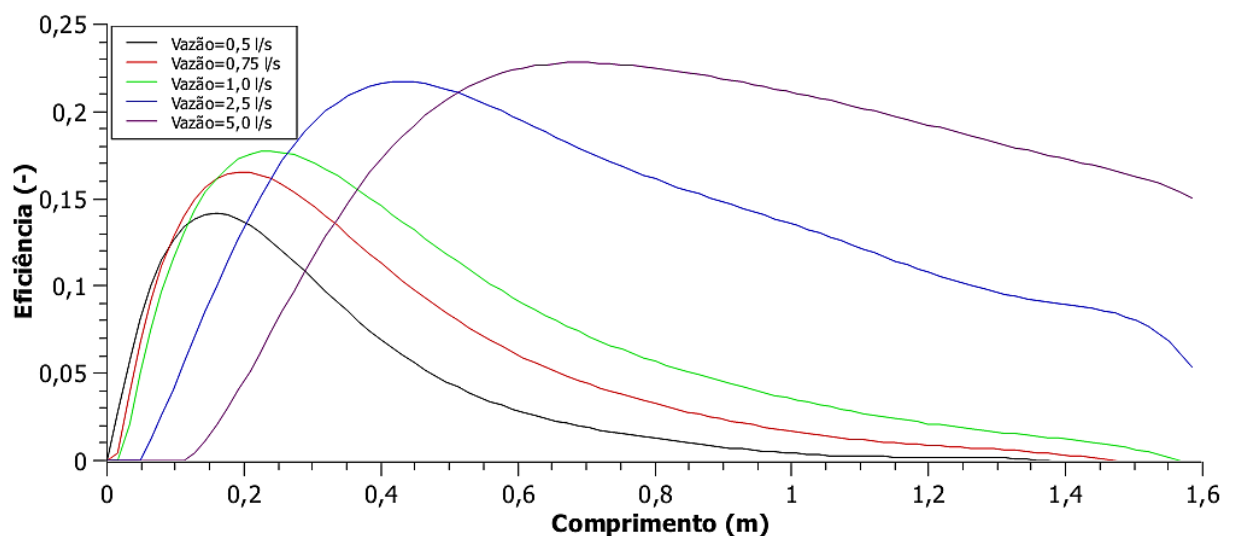


Fonte: O autor, 2017.

Nota-se que as curvas de menores vazão (0,5 a 1,0 l/s), a temperatura é incrementada rapidamente no início do coletor e após certo ponto é mantida, praticamente, constante. Já para vazões superiores (2,5 e 5,0 l/s), a temperatura é incrementada gradativamente ao longo do equipamento, aproveitando todo seu comprimento.

As curvas de eficiência pontual na linha média do domínio do escoamento de ar para as vazões de 0,5 l/s, 0,75 l/s, 1,0 l/s, 2,5 l/s e 5,0 l/s, para intensidade de irradiação solar de  $700 \text{ W/m}^2$ , estão representados no Gráfico 17.

Gráfico 17 – Curvas de eficiência pontual.



Fonte: O autor, 2017.

Analisando os perfis de eficiência pontual constata-se que para cada uma das vazões há uma posição na qual a eficiência de troca térmica torna-se muito pequena.

Quando os dados experimentais são considerados é fato que há até mesmo um resfriamento após certa posição do comprimento do aquecedor. Esse resfriamento está relacionado com a região de baixa eficiência térmica e características não ideais, como defeitos de fabricação, vazamentos de ar e fatores ambientais.

Neste contexto, é interessante que a dimensão do comprimento de um coletor solar de placas planas não seja maior que o comprimento ou posição na qual sua eficiência pontual seja muito pequena.

Pode-se fixar, como exemplo, uma eficiência mínima de 2,0 % e construir o coletor com o comprimento que evite regiões de eficiências menores. É importante destacar que as dimensões do canal de escoamento, também, tem influência nos resultados.

Sendo assim, para as dimensões de canal de escoamento utilizadas, a Tabela 17 relaciona o comprimento máximo do coletor para cada vazão de aplicação.

Tabela 17 - Comprimentos ideais de acordo com a vazão de ar.

<b>Vazão de operação (L/s)</b>	<b>Comprimento máx. do coletor (mm)</b>
<b>0,5</b>	690
<b>0,75</b>	950
<b>1,0</b>	1220

Fonte: O autor, 2017.

Caso o coletor real opere próximo ao ideal, o ganho de temperatura para um comprimento de baixa eficiência será pequeno ou nulo. Caso um coletor real opere com resfriamento, isso ocorrerá na região de baixa eficiência. Portanto, a adoção de um comprimento máximo garante a economia de material e a temperatura de saída mais próxima da projetada ou desejada.

## 5 CONCLUSÕES

A análise térmica executada permitiu encontrar a distribuição de temperatura e a eficiência térmica do protótipo construído, mostrando que o coletor de placas planas paralelas, se utilizado na região Sul do Brasil, possui uma eficiência que possibilita sua adoção para algumas práticas, como uso em trocadores de calor, desidratadores alimentícios, entre outras.

O sistema de aquisição de dados se mostrou eficiente e confiável, pois operou durante um longo período de tempo com carga térmica, o que garante sua aplicação para diversas áreas afins, já que utiliza *hardware* de baixo custo e de fácil acesso, além de *software* livre.

O modelo proposto ao sistema, resolvido pelo Elmer, forneceu resultados confiáveis e próximos aos obtidos experimentalmente, podendo ser utilizado para realizar estudos e modificações na geometria, no material e nos parâmetros do equipamento, a fim de projetar coletores solares com menor custo e maior eficiência.

É possível obter a temperatura adequada para uma determinada aplicação variando a vazão de ar por meio da rotação do soprador.

O coletor solar real apresentou uma região de resfriamento a partir do ponto de seu comprimento em que a temperatura atinge seu valor máximo de acordo com as análises de Ong (1995) e com a simulação realizada. Sendo assim, constata-se que, para uma vazão qualquer, há um comprimento máximo que pode ser previsto a fim de evitar uma região de menor eficiência ou até mesmo de resfriamento, como aquela obtida experimentalmente.

Para estudos futuros, sugere-se a implementação de um controle de temperatura baseado no modelo proporcional, integral e derivativo (PID), para que equipamentos deste tipo tenham aplicações em sistemas que exigem temperatura constante, e a elaboração de uma interface gráfica para o sistema de monitoramento de temperatura, possibilitando uma interação mais simples com o usuário.

## REFERÊNCIAS

- AIRFAN. **Microventilador Industrial Apollo 12 V DC**. Disponível em: <[http://www.airfan.com.br/loja/index.php?route=product/product&path=22&product\\_id=101](http://www.airfan.com.br/loja/index.php?route=product/product&path=22&product_id=101)>. Acesso em: 22 jun. 2017.
- ANDERSON JR., John D. **Computational fluid dynamics: the basics with applications**. International edition. Singapore: McGraw Hill, 1995. 547 p.
- ANEEL. **Atlas de energia elétrica no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002. 153 p.
- ARDUINO. **Introduction**. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 22 jun. 2017.
- ARDUINO. **Arduino Uno Rev 3**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 22 jun. 2017.
- BATLLES, F. J.; ROSIEK, S. A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring. **Energy Conversion and Management**, v. 49, p. 3746-3754, 2008.
- BOLTON, W. Measurements systems. In \_\_\_\_\_. **Instrumentation and Control Systems**. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2004.
- BONDARENKO, D. et al. Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 10, p. 160-167, 2017.
- BORDEIANU, C. C. et al. Scilab software package for the study of dynamical systems. **Computer Physics Communications**, v. 178, p. 788-793, 2008.
- BUDEA, S. Solar Air Collectors for Space Heating and Ventilation Applications - Performance and Case Studies under Romanian Climatic Conditions. **Energies**, v. 7, p. 3781-3792, 2014.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Distrito Federal: Embrapa, 2010. 51 p.

CSC–IT Center for Science LTDA. **Elmer**. Disponível em: < <https://www.csc.fi/web/elmer>>. Acesso em: 24 jun. 2017.

CHUNG, T.J. **Computational fluid dynamics**. Cambridge: University Press, 2002. 1012 p.

FERZIGER, J. H.; PERÍC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. 3th rev. New York: Springer, 2002. 423 p.

FUENTES, M. et al. Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino <sup>TM</sup> that complies with IEC standards. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 130, p.529-543, 2014.

GAD, H. E.; GAD, H. E. Development of a new temperature data acquisition system for solar energy applications. **Renewable Energy**, v. 74, p. 337-343, 2015.

GLAVELIS, T. et al. A computational evaluation of some free mathematical software for scientific computing. **Journal of Computational Science**, n.1, p. 150-158, 2010.

INCROPERA, P. F. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INMET. **Rede de estações meteorológicas automáticas do INMET**. Nota Técnica nº. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET. 2011.

INSTRUTHERM. **Anemômetro AD-250**. Disponível em: <<https://www.instrutherm.net.br/anemometro-digital-portatil-escala-0-4-a-30-0-m-s-mod-ad-250.html>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

KARIM, M. A. et al. Mathematical modeling and performance analysis of different solar air collectors. **IIUM Engineering Journal**, v.16, n. 2, p. 43-55, 2015.

MACHADO, A. V. et al. Avaliação de um secador solar sob convecção forçada para a secagem do pedúnculo do caju. 2011. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 01-07, 2011.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75-97, 2007.

MANJUNATH, M. S. et al. Numerical analysis of the influence of spherical turbulence generators on heat transfer enhancement of flat plate solar air heater. **Energy**, v. 121, p. 616-630, 2017.

MAURIZIO, E. D. P. Data Acquisition Systems: Hardware. In\_\_\_\_\_. **Data acquisition systems: from fundamentals to applied design**. New York: Springer, 2013.

ONG, K. S. Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure. **Solar Energy**, v. 55, n. 2, p. 93-109, 1995.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p.

RABACK, P.; PURSULA, A. Finite element simulation of the electro-mechanical pull-in phenomenon. In: **European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS)**, p. 24-28, 2004.

RABACK, P.; MALINEN, M. **Overview of Elmer**. Finlândia: CSC – IT Center of Science, 2014. 10 p.

RABACK, P.; et al. **Elmer models manual**. Finlândia: CSC – IT Center of Science, 2014. 259 p.

SCILAB ENTERPRISES S.A.S. **About Scilab**. 2017. Disponível em: <<http://www.scilab.org/scilab/about>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

TESFAMARIAM, Dawit A. et al. Modeling and experiment of solar crop dryer for rural application. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences**, Special issue 9, p. 109-118, 2015.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35 precision centigrade temperature sensors**. Data Sheet, 1999.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE P. U. B. De. **Sensores industriais – fundamentos e aplicações**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2011.

ULVROVÁ, M. et al. Numerical modelling of convection interacting with a melting and solidification front: Application to the thermal evolution of the basal magma ocean. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 206-207, p. 51-66, 2012.

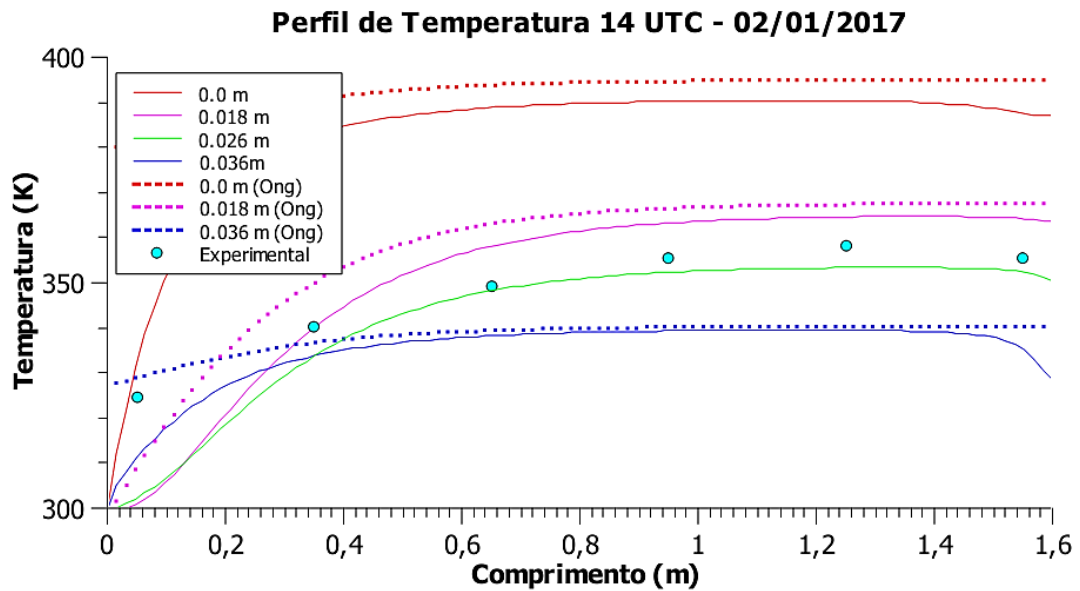


ZHANG, Z. et al. Multiphysics 3D modelling of ironless permanent magnet generators. **Energy Procedia**, p. 34-43, 2014.

ZILLES, R. **Comparação experimental de testes de coletores solares planos com simulador e com radiação solar**. 1987. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC. Universidade do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1987.

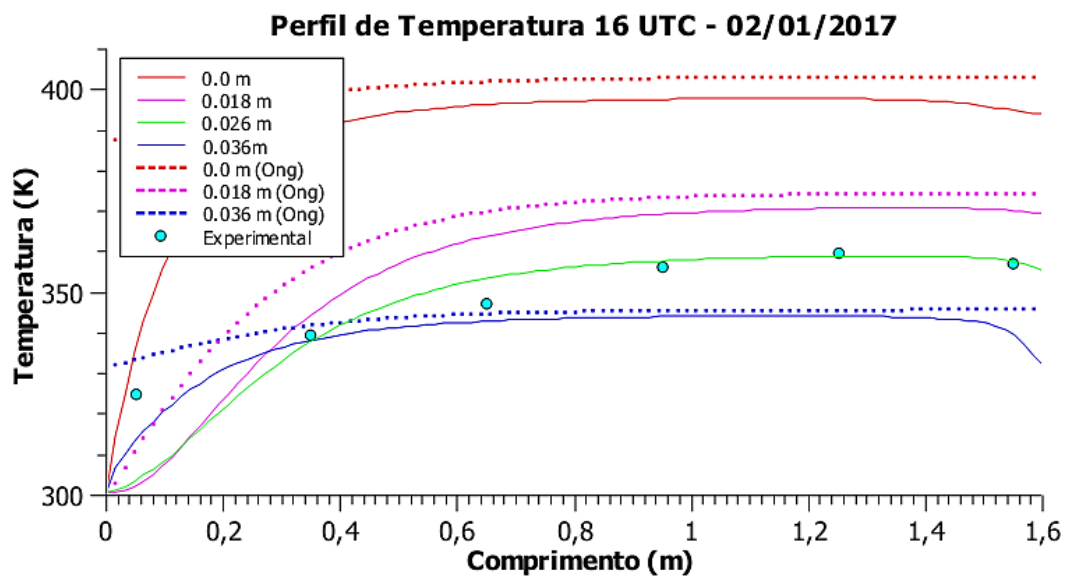
## APÊNDICE A – Gráficos de resultados simulados e experimentais

Perfil de temperatura: 14 UTC – 02/01/2017.



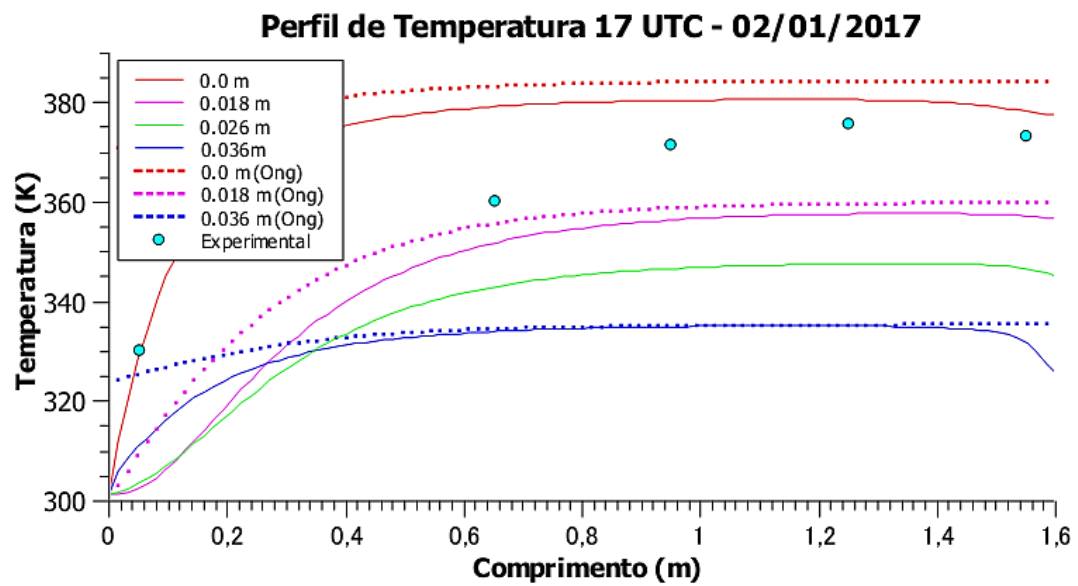
Fonte: O autor, 2017.

Perfil de temperatura: 16 UTC – 02/01/2017.



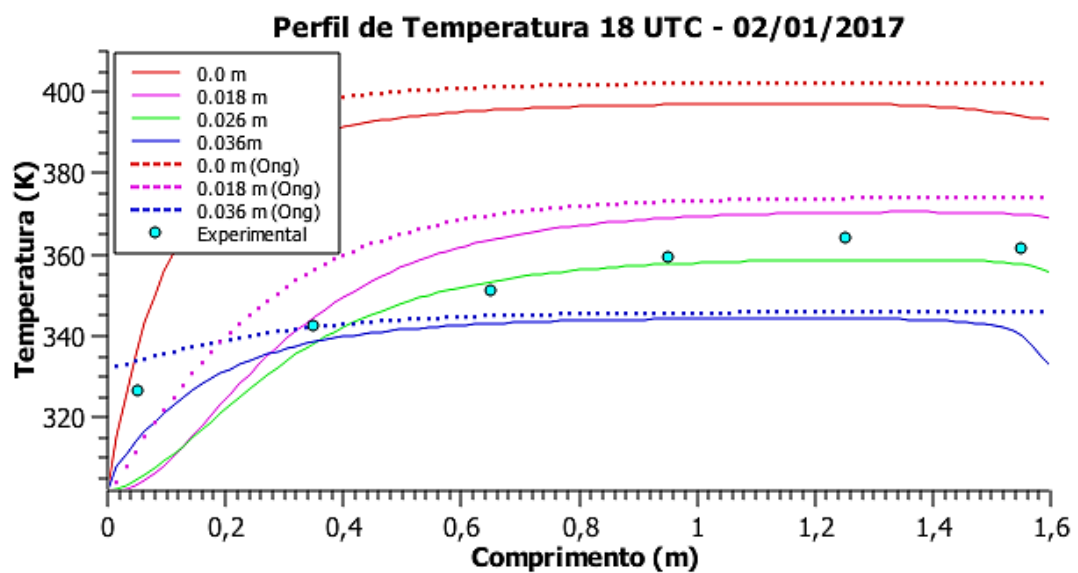
Fonte: O autor, 2017.

Perfil de temperatura: 17 UTC – 02/01/2017.



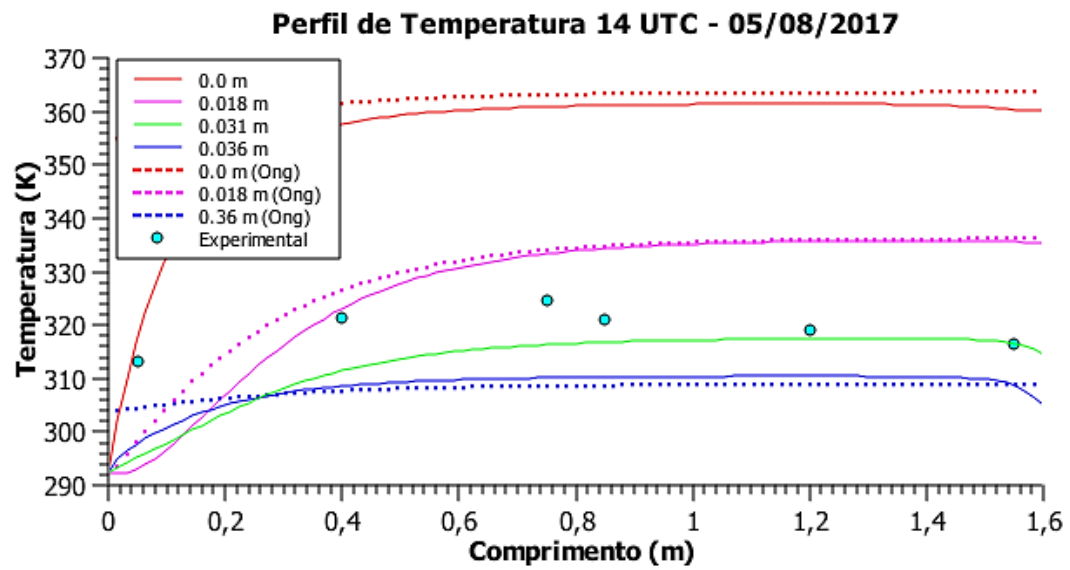
Fonte: O autor, 2017.

Perfil de temperatura: 18 UTC – 02/01/2017.



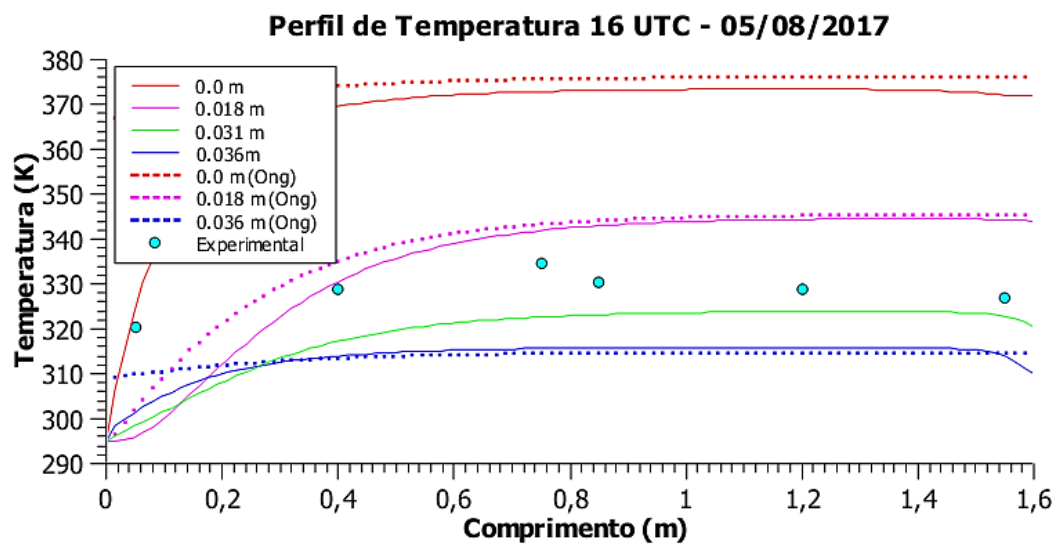
Fonte: O autor, 2017.

Perfil de temperatura: 14 UTC – 05/08/2017.



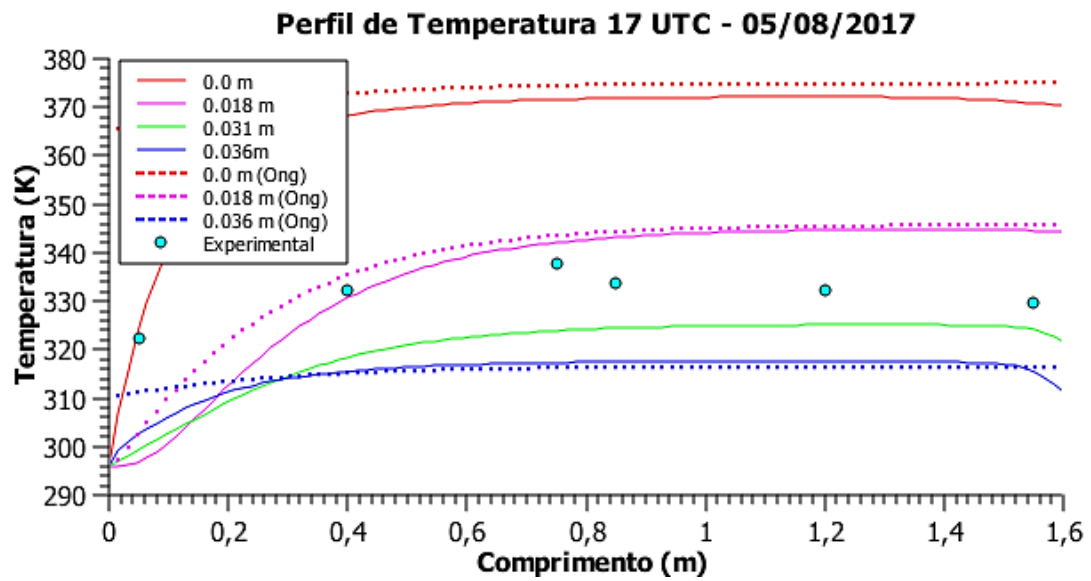
Fonte: O autor, 2017.

Perfil de temperatura: 16 UTC – 05/08/2017.



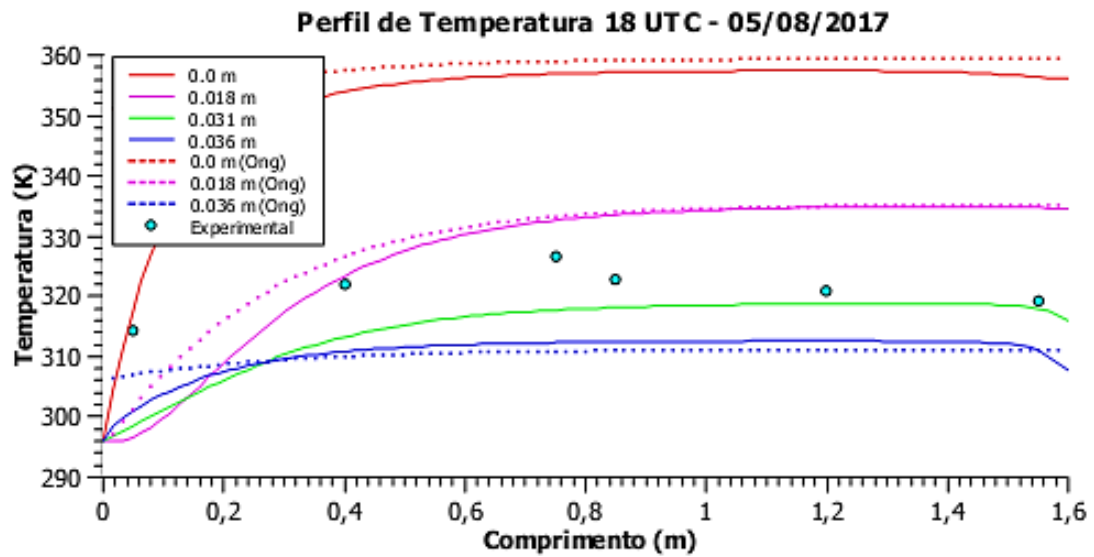
Fonte: O autor, 2017.

Perfil de temperatura: 17 UTC – 05/08/2017.



Fonte: O autor, 2017.

Perfil de temperatura: 18 UTC – 05/08/2017.



Fonte: O autor, 2017.