

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

José Mariano Lima Garcia

**Modelagem e construção de uma bancada experimental
para avaliação de sistema termossifão**

Brasil

7 de junho de 2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

José Mariano Lima Garcia

**Modelagem e construção de uma bancada experimental
para avaliação de sistema termossifão**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para obten-
ção do título de Engenheiro Mecânico

Orientador: Prof^o Dr. Leandro Oliveira Salviano

Brasil

7 de junho de 2023

José Mariano Lima Garcia

Modelagem e construção de uma bancada experimental para avaliação de sistema termossifão/ José Mariano Lima Garcia. – Brasil, 7 de junho de 2023-
81 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof^o Dr. Leandro Oliveira Salviano

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Graduação - Engenharia Mecânica, 7 de junho de 2023.

1. Convecção Natural. 2. Bancada experimental. 3. Coletor solar de placa plana I. Leandro Oliveira Salviano. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP). III. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). IV. Modelagem e construção de uma bancada experimental para avaliação de sistema termossifão

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

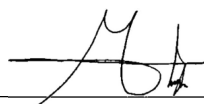
ATA DA DEFESA - TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Ao sétimo dia do mês de Junho de dois mil e vinte e três, às oito horas e trinta minutos, em reunião presencial e também transmitida pelo Google Meeting (<https://meet.google.com/mmm-qkrc-dti>), o discente JOSÉ MARIANO LIMA GARCIA, matriculado sob o RA 171051327, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMA TERMOSSIFÃO, tendo como banca examinadora o Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano (Orientador/Presidente), Prof. MSc. Masoud Ghanbari kashani, Eng. Vitor Fiorito Da Silva. Após exposição e arguição, o discente foi **APROVADO** pela Comissão Examinadora. Encerrada as atividades, lavro a presente Ata.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano
(Orientador/Presidente) _____

Prof. MSc. Masoud Ghanbari kashani _____



Masoud G. Kashani

Eng. Vitor Fiorito Da Silva _____



Documento assinado digitalmente

VITOR FIORITO DA SILVA

Data: 07/06/2023 16:41:02-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Discente:

José Mariano Lima Garcia _____

Ilha Solteira, 07 de Junho de 2023.

Agradecimentos

Se fosse nominar todos aqueles a quem devo agradecimentos, talvez a lista saísse maior que o próprio trabalho. Dessa forma, agradeço a todos os que estiveram comigo a cada passo tomado durante o desenvolvimento desta pesquisa. Que puderam se fazer presentes tanto física quanto virtualmente nos momentos de necessidade, para que eu pudesse me reerguer e seguir com o trabalho. Agradeço aos departamentos de Engenharia Mecânica e Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira que cederam recursos de todos os tipos para o desenvolvimento da bancada. Agradeço, por fim, à vida, que em seus caminhos imprevisíveis me deu a oportunidade da convivência sadia e edificante que tenho com familiares e amigos próximos, permitindo-me finalizar esse Trabalho de Conclusão de Curso.

Resumo

Com a crescente preocupação mundial por fontes de energia renováveis e novas matrizes energéticas, aumenta-se também a necessidade de estudos na área de eficiência energética, na proporção que podem fornecer novos meios, métodos e práticas mais eficientes e sustentáveis de se obter energia útil. Assim, nesse trabalho é demonstrada a construção de uma bancada experimental de baixo custo para testes em coletores solares de placa plana do tipo estáticos. Para isto, é preciso levantar os principais pontos que a bancada precisa oferecer para contemplar a maior quantidade de estudos possíveis, tais como: mudança de angulação, inserção de dispositivos para aumento das taxas de transferência de calor e troca do tubo do coletor solar. Com os principais pontos definidos, segue-se para a modelagem 3D e 2D da bancada, seguido da montagem da mesma nos laboratórios da FEIS-UNESP. Visando implementar a digitalização no trabalho, e também facilitar a coleta de dados, desenvolve-se um aquisitor de dados em Arduino + *Processing*, que coletará os dados de todos os termopares dispostos na bancada experimental. Findo o trabalho, resulta uma bancada com potencial para inúmeros testes, dentre eles: Mudança de ângulos do coletor solar, mudança do tubo do coletor solar, mudança das aletas do coletor solar, mudança da potência irradiada para o coletor solar, bem como acrescentar ainda mais termopares para um estudo mais completo da distribuição térmica tanto no tubo quanto nas aletas do coletor solar. Para futuros estudos, ainda pode-se avaliar o aquisitor de dados e verificar a possibilidade de aumentar a frequência de coleta de dados para realizar um estudo em regime transitório do coletor solar. Disponibiliza-se desenhos técnicos, bem como a programação usada no desenvolvimento da bancada.

Palavras-chave: Transferência de calor. Bancada experimental. Coletor solar de placa plana.

Abstract

With the global concern over renewable energy sources and new energetic sources increasing, there is also a necessity to develop further studies in the energy efficiency field, where new methods and practices can be developed to achieve new forms to obtain useful energy. Therefore, in this study is presented a construction of a low cost experimental workbench for static flat plane solar collector testing. For this, it is needed to raise the main targets that will allow the workbench to be useful in the most variety experiments, i.e. angle changing, passive devices to increase the heat transfer flow and exchange of the collector tube, among others. With the main goals defined, the next step is to design a 3D/2D workbench model, followed by the workbench assembly in the FEIS-UNESP labs. Looking for the implementation of the digitalization in this work, and to make the data collecting easier, an data acquirer is developed in Arduino + *Processing*, which will collect the thermal response of the solar collector. Finally, there is a workbench with potential for numerous researches such as: angle change of the solar collector, solar collector tube exchanging, change on the irradiated power over the solar collector, as well as to add even more termopairs for a complete study of the thermal distribution in the tube and in the solar collector fins. For further studies, the acquirer can be studied to have its collect frequency increased, to study the transient flow in the solar collector. All the drawings and codes are available in this work.

Keywords: Heat transfer. Experimental workbench. Flat plane solar collector.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de coletor solar instalado	18
Figura 2 – Principais tipos de coletor solar	19
Figura 3 – Coletores solares mais usados no Brasil e no mundo	20
Figura 4 – Coletor solar	21
Figura 5 – Fitas torcidas	22
Figura 6 – <i>Wire coil</i>	23
Figura 7 – Deltas	23
Figura 8 – Tubo Corrugado	24
Figura 9 – Modelo para o projeto	26
Figura 10 – Disposição dos termopares	26
Figura 11 – Esquemático do experimento	27
Figura 12 – Base final modelada	30
Figura 13 – Base modelada - vista lateral	31
Figura 14 – Projeto 3D da fonte térmica	32
Figura 15 – Impacto do desnível em um sistema termossifão	33
Figura 16 – Bancada pronta	33
Figura 17 – Primeiro teste da bancada - temperaturas antes e depois	34
Figura 18 – Primeiro teste da bancada - visualização do escoamento	34
Figura 19 – Aquisitor de dados	35
Figura 20 – Esquema elétrico	36
Figura 21 – Filtro resistor capacitor - Passa baixa	37
Figura 22 – Sistema de aquisição de dados pronto	37
Figura 23 – Esquemático geral da bancada pronta	40
Figura 24 – Software para calibração dos termopares	41
Figura 25 – Software para coletar temperaturas	41
Figura 26 – Comparação entre o projeto e a bancada finalizada	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Temperaturas do banho térmico	38
Tabela 2 – Dados adquiridos pelo Arduino, temperaturas ID 0 a 8	39
Tabela 3 – Dados adquiridos pelo Arduino, temperaturas ID 9 a 16	39
Tabela 4 – Coeficientes da reta	40
Tabela 5 – Leituras - termopares	75

Sumário

	Introdução	17
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2	METODOLOGIA	25
3	RESULTADOS	29
4	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICES	51
	APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO	53
	APÊNDICE B – CÓDIGO PROCESSING - CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	67
	APÊNDICE C – CÓDIGO PROCESSING - COLETA DE DADOS .	71
	APÊNDICE D – TABELAS	75

Introdução

Em meio a pontos positivos e negativos, as fontes de energias renováveis tornaram-se um foco mundial. Nos últimos 10 anos, o investimento nessa área quadruplicou no mundo, chegando a 2,5 trilhões de dólares segundo a ONU. No relatório produzido pela entidade juntamente com outros órgãos de pesquisa, um dos principais pontos que alavancaram o crescimento foi a redução nos custos dos equipamentos (PRESSE, 2022).

Sendo assim, é evidente que a acessibilidade financeira por parte da população à equipamentos voltados à economia verde impulsiona o setor, trazendo grandes benefícios como a redução das emissões de carbono por meio dos combustíveis fósseis e nas contas domésticas.

Em consonância com a temática, existe também acordos mundiais como, por exemplo, a agenda 2030 que reúne 17 objetivos do desenvolvimento sustentável, sendo um deles a energia limpa e acessível (ONU, 2022). Inclusive, muitas empresas estão dedicadas ao assunto, a exemplo a Siemens Energy, que visa zerar suas emissões de carbono até 2030. (ENERGY, 2022).

Conforme o exposto, fica nítido que há uma corrida no sentido de mudança das matrizes energéticas mundiais, tanto por uma preocupação com o meio ambiente, quanto por uma questão de marketing das grandes empresas (*green money*). Assim, investir, pesquisar e desenvolver novos métodos, práticas e equipamentos no campo da energia verde é um ponto crucial e de importância para competir nessa corrida.

No Brasil, a energia solar caminha a passos largos para consolidar-se como uma das maiores matrizes energéticas. Segundo a (EXAME, 2022) em 2022 a somatória da geração Brasileira (grande porte e geração própria) de energia solar fotovoltaica ultrapassou a marca de 14 gigawatts, ultrapassando a potência instalada na UHE Binacional Itaipu.

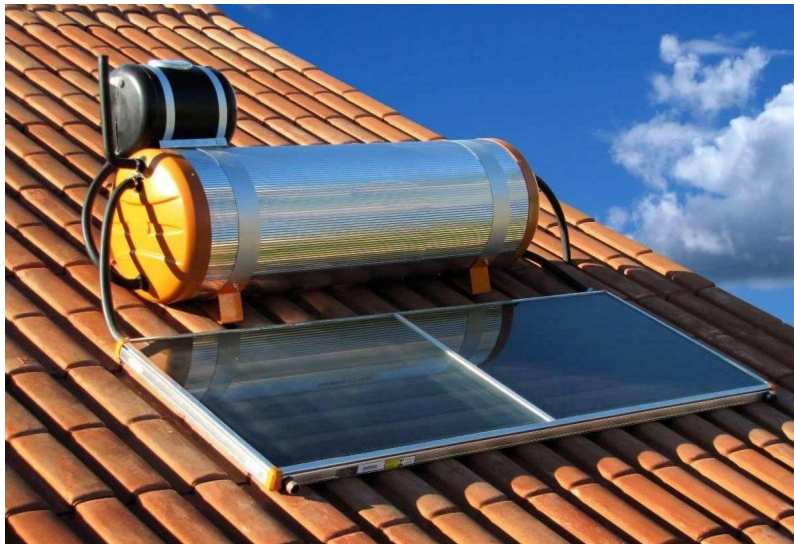
Além disso, conforme o Atlas Brasileiro de Energia Solar (MARTINS et al., 2017) o Brasil tem muito potencial para explorar a energia solar, na medida que a taxa de incidência média anual é de $4911,83 \frac{Wh.dia}{m^2}$ contra uma média de $4285 \frac{Wh.dia}{m^2}$ na China, país que tem uma geração de 78,1 gigawatts somente em energia solar. (ATLAS, 2022).

Uma outra forma de coletar energia por meio do sol reside nos coletores solares. Os coletores solares são dispositivos usados na conversão de energia solar (radiação) em energia térmica para aquecimento de fluidos, sejam eles ar, água, ou outros. Os coletores solares podem ser divididos em seguidores e estáticos, e então sub-categorizados conforme a geometria usada para a conversão de energia: parabólico, plano, etc.

O escopo deste trabalho será a respeito de coletores solares de placa plana do tipo

estático, exemplificado pela figura 1. Esse tipo de coletor está geralmente associado a aquecimentos solares de baixa temperatura (no máximo a 70 °C) e, portanto, usado em aquecimento de água para uso doméstico.

Figura 1 – Exemplo de coletor solar instalado



Fonte: (HIDREL, 2021)

O princípio de funcionamento desse tipo de coletor é baseado na convecção do tipo natural. Há dois tipos de convecção: a natural e a forçada. A convecção natural é estruturada na variação de densidade do fluido conforme sua temperatura varia. Dessa forma, para o caso da água, sua densidade diminui conforme sua temperatura aumenta, fazendo com que sofra um processo de ascensão quando na presença de água em menor temperatura. Essa ascensão promove a circulação do fluido dentro do coletor, eliminando o uso de bombas. A esses sistemas denominamos de termossifões. Já a convecção forçada, promove a troca de calor e circulação do fluido por meio do uso de bombas hidráulicas.

A partir do exposto, esse trabalho objetiva apresentar uma revisão bibliográfica dos métodos mais usados para intensificar as taxas de transferência de calor em sistemas passivos de coletores solares e, baseado no artigo (Sandhu GURVEER; GARCIA, 2014) desenvolver uma bancada experimental para prototipagem de novos métodos/dispositivos de intensificação de troca térmica.

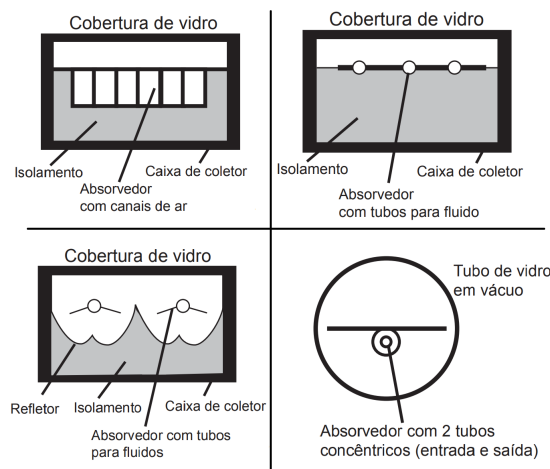
1 Revisão bibliográfica

Conforme a necessidade por mais energia cresce no mundo, cresce também o consumo dos recursos não renováveis para geração de energia, exigindo que os equipamentos sejam mais eficientes com menos consumo de matéria prima. É nesse impasse de 'mais' por 'menos' que maioria dos estudos se concentra. Isso porque, no caso de coletores solares há duas opções: a convecção natural ou a convecção forçada, e para os dois tipos de convecção, enfrenta-se o mesmo problema: o atrito.

O atrito faz com que a vazão mássica do sistema seja negativamente afetada, pois gera uma perda de carga no sistema, exigindo deste mais energia (na forma de empuxo) para executar o mesmo trabalho de transferência de calor. O ponto ideal é atingir as maiores taxas de transferência de calor com a menor perda de carga no sistema, para que seja possível ter maiores vazões mássicas sem adição de energia externa por meio de, por exemplo, bombas. E, mesmo com bombas, quanto maiores as perdas de carga no escoamento, mais energia é consumida pelo sistema para manter a mesma vazão mássica, fato que foge dos ideais tanto de economia quanto de meio ambiente (mais energia, mais custos, mais consumo).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os coletores solares são dispositivos que absorvem a radiação solar incidente e a transferem para um fluido de trabalho (**NBR 17003**). Com base nessa definição, a figura 2 exemplifica alguns tipos de coletores solares mais comuns.

Figura 2 – Principais tipos de coletor solar



Fonte: (RODRIGUES; MATAJS, 2010)

Todos esses coletores solares funcionam a partir do mesmo princípio básico: conversão de energia solar em térmica, energia essa que é transferida para o fluido de trabalho. A principal diferença entre os tipos de coletores solares é a forma com a qual essa transferência

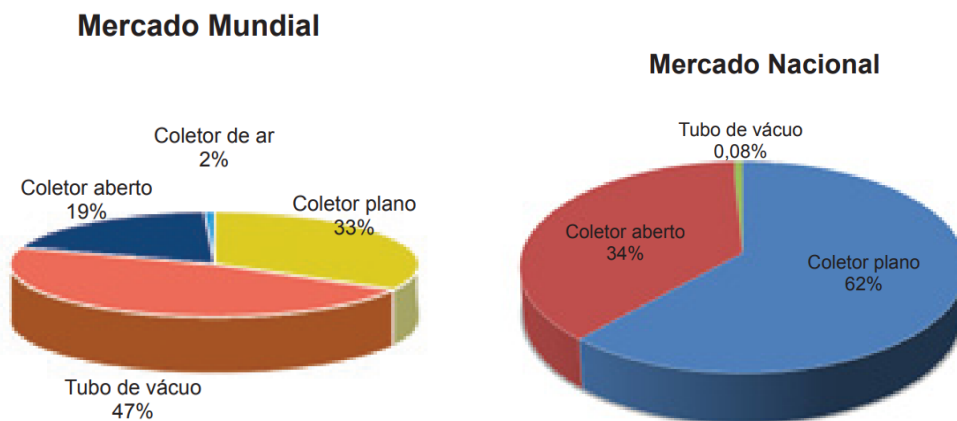
é realizada e também o fluido de trabalho. Por exemplo, os coletores a ar são desenvolvidos para o aquecimento do ar, que é o fluido de trabalho desses coletores

Os coletores planos com concentrador parabólico têm em sua construção um conjunto de dois espelhos parabólicos cujo foco é o absorvedor interno. A ideia por trás de um espelho parabólico é que ele permite a entrada de mais raios solares concentrados num mesmo ponto, diferente de espelhos semicirculares cuja área de incidência solar é menor.

Há também os coletores solares de tubo à vácuo. Nesse caso de coletores solares, o diferencial é que o tubo absorvedor está hermeticamente isolado do meio externo por meio de uma câmara de vácuo, que permite a entrada de raios solares. Assim, o tubo pode ser aquecido por meio da radiação, porém não perde calor para o ambiente na forma de convecção, como pode acontecer nos outros casos.

Por fim, temos os coletores solares de placa plana. A Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) fez um levantamento dos coletores mais usados comercialmente no mundo e no Brasil, conforme figura 3

Figura 3 – Coletores solares mais usados no Brasil e no mundo

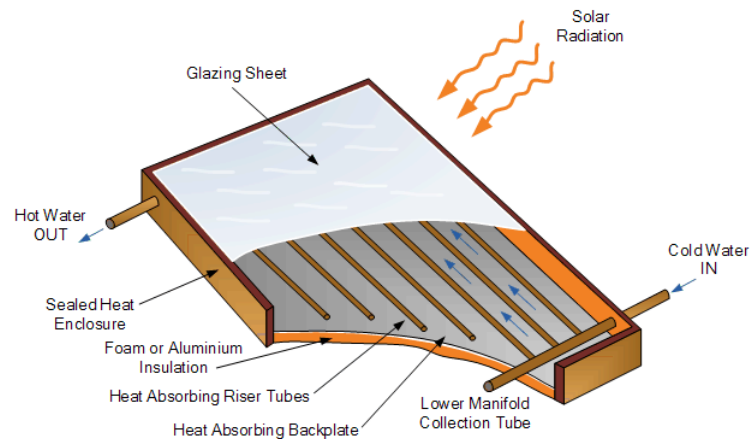


Fonte: (RODRIGUES; MATAJS, 2010)

Segundo uma pesquisa realizada pela ABRAVA, dentro do mercado mundial os coletores de tubo a vácuo são os mais usados, seguido pelo coletor plano, coletor aberto e por fim o coletor a ar. Já ao observar o mercado nacional, nota-se que o coletor de tubo a vácuo é o menos usado, sendo substituído pelo coletor plano. Em segundo lugar temos o coletor aberto.

Isso ocorre pois os coletores de placa plana tem um baixo custo de produção e sua instalação é facilitada pela simplicidade da geometria, compatível com os telhados residenciais do Brasil. Esse tipo de coletor é basicamente constituído por 4 partes principais : o encapsulamento, a superfície absorvedora, o isolamento inferior e a folha de vidro superior, conforme pode ser observado na figura 4. Cada parte precisa ser devidamente isolada e resistente às condições adversas do meio ambiente a que são expostas.

Figura 4 – Coletor solar



Fonte: (COMPANY, 2022)

O encapsulamento consiste na estrutura lateral de todo o equipamento. Precisa ser devidamente isolado para evitar perdas de calor para o ambiente. Em geral, essas estruturas são construídas em alumínio devido a fácil conformação plástica do metal e disponibilidade no mercado. Outro ponto importante é que esse material também é leve e resistente. Visto que o coletor solar para uso residencial é instalado no telhado das casas, o fator leveza é de suma importância. A folha de vidro acima do coletor solar tem por objetivo facilitar a entrada de radiação solar. Dessa forma, a transmissibilidade do material é de grande importância. Quanto mais fácil for para os raios solares atingirem a placa absorvedora (que fica logo abaixo), mais energia é disponibilizada para troca térmica do coletor. O ideal é que a folha também possa servir como um concentrador. O vidro pode ser liso, canelado ou martelado. Um dos principais testes do coletor solar é a resistência desse material, pois, em certas localidades do mundo, ele precisa resistir a mudanças bruscas de temperatura, gelo, e ter uma vida útil longa, mantendo suas características físicas competentes à transmissibilidade.

A superfície isolante é geralmente construída em isopor e/ou outro material isolante como espuma, e seu objetivo é evitar que a superfície absorvedora perca calor pela parte inferior do coletor.

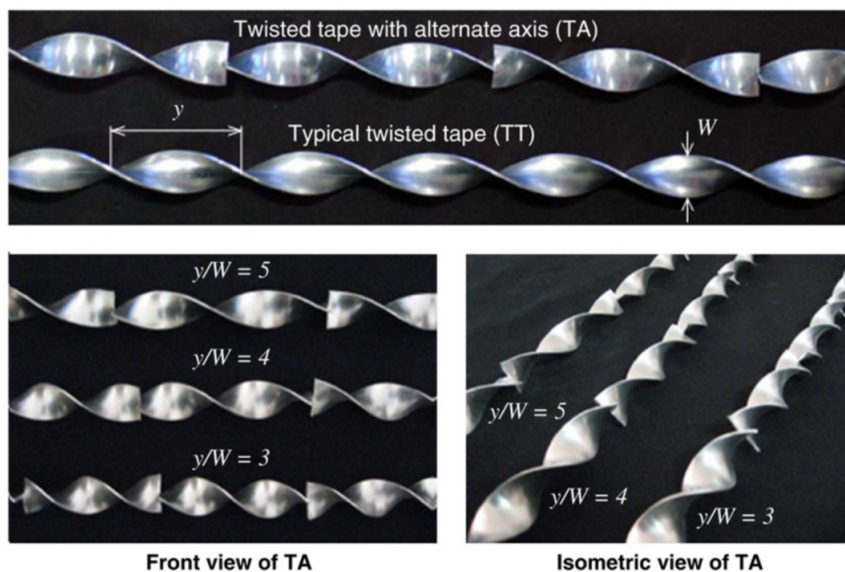
Por fim, existe a placa absorvedora que é o principal componente do coletor solar, na medida que é onde a troca térmica efetivamente acontece. A placa absorvedora consiste em uma série de tubos, aletados ou não, que recebem a energia dos raios solares e, por meio da condução, seguida da convecção, transferem essa energia para o fluido de trabalho, que flui interno ao tubo. Aqui o campo abre-se para diversas possibilidades de intensificação da troca térmica, na medida que tanto o tubo, quanto as aletas e insertos podem ser estudados para melhorar a troca térmica. O ideal é que a superfície do tubo/aletas tenha alta absorvância, sendo portanto, indicado a pintura com tinta preta, cuja absorvância é de 97,8 % (DORNELLES; CARAM; SICHIERI, 2014).

O estudo desse trabalho de conclusão de curso limita-se a construir uma bancada experimental para que futuramente testes com dispositivos e/ou métodos de intensificação de troca de calor possam ser realizados. Acerca desses métodos, já existem alguns pré concebidos dentro da literatura existente que podem vir a ser testados e otimizados na bancada desenvolvida. Alguns deles são:

- Twisted tapes;
- Wire coils;
- Deltas;
- Dimples;
- Tubos corrugados;
- Métodos conjuntos.

Como exemplo, Wongcharee e Eiamsa ([WONGCHAREE; EIAMSA-ARD, 2011](#)) conduziram diversos experimentos com fitas torcidas (*twisted tapes*), variando a relação de torção e introduzindo fitas com rosca direita e esquerda a diferentes espaçamentos. Os resultados de mostram que, quando comparado com um tubo liso, tanto o fator de atrito normalizado quanto o número de Nusselt aumentam conforme a razão de torção (y/w) diminui. Isso se dá pois para menores razões, há mais mistura do fluido e mais vórtices são causados. Além disso, nota-se um aumento do número Nusselt conforme aumentamos o número de Reynolds.

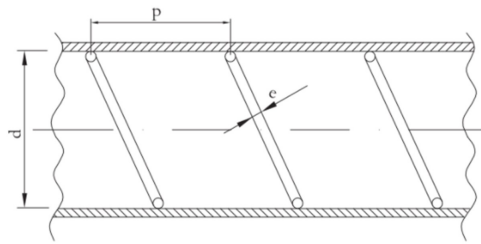
Figura 5 – Fitas torcidas



Fonte: ([WONGCHAREE; EIAMSA-ARD, 2011](#))

Como segundo exemplo de implementação na bancada experimental, temos o trabalho de Alberto, Ruth e José (GARCÍA; MARTIN; GARCÍA, 2013) que discorreram sobre a inserção de *wire coils* como dispositivos passivos para intensificação de transferência de calor. A escolha do dispositivo foi baseada em trabalhos anteriores de Garcia (GARCÍA; VICENTE; VIEDMA, 2005), onde encontrou-se um tamanho ideal adimensional de passo como sendo 1 e uma relação de diâmetros de 0,0717.

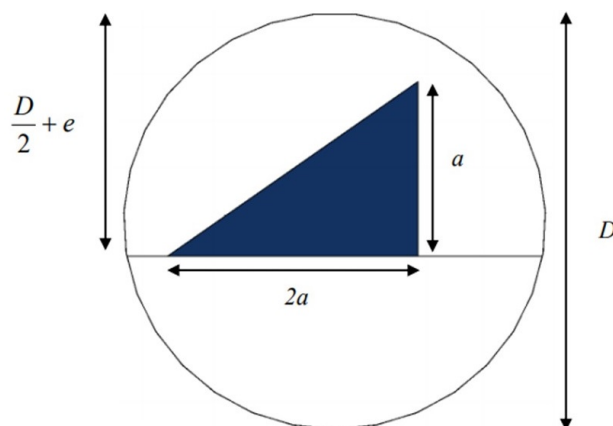
Figura 6 – *Wire coil*



Fonte: (GARCÍA; MARTIN; GARCÍA, 2013)

Por outro lado, (SALVIANO LEANDRO, 2018) fez uma abordagem computacional sobre insertos no formato Delta, representados na figura 7 a fim de provocar turbulências no escoamento e, como resultado, intensificar a transferência de calor no sistema. Foi determinado que a melhor relação aumento das taxas de transferência de calor e do atrito foi para um ângulo de ataque de 30° mas que para um ângulo de 45° temos maiores números de Nusselt, embora o escoamento seja penalizado pelo fator de atrito.

Figura 7 – Deltas



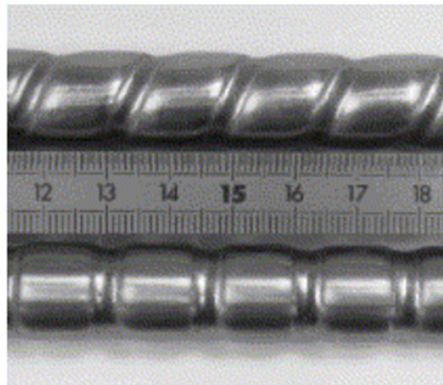
Fonte: (SALVIANO LEANDRO, 2018)

Uma outra forma de intensificação de transferência de calor que poderá ser implementada na bancada é o método que usa tubos corrugados. Esses dispositivos consistem em tubos deformados plasticamente para obter um tipo específico de geometria, seja ela espiral, em discos, ou outros formatos. A principal função das corrugações é a de gerar um escoamento secundário, induzido pelas componentes radiais de velocidade, que misturam

as camadas de fluido. O escoamento axial pode apresentar separação e recolamento da camada limite, a depender da forma da corrugação e do número de Reynolds.

O trabalho desenvolvido por (RAINIERI; PAGLIARINI, 2002) mostrou que, para uma faixa de Reynolds igual a $90 \geq Re \geq 800$, corrugações transversais podem ser mais desejáveis que helicoidais, pois promovem maiores taxas de transferência de calor a partir da transição para um escoamento turbulento. Todavia, corrugações helicoidais são industrialmente escaláveis, o que facilita e reduz o custo da produção.

Figura 8 – Tubo Corrugado



Fonte: (RAINIERI; PAGLIARINI, 2002)

Com base no exposto, é possível notar que os coletores solares de placa plana estáticos além de serem largamente utilizados, ainda podem ter sua eficiência aprimorada por meio de insertos no tubo, bem como modificações na angulação de instalação, na superfície aletada do tubo, entre outros. Assim, fica evidente que estudos nesse campo são necessários, para que possa existir dispositivos mais eficientes à disposição da indústria.

2 Metodologia

O objetivo desse trabalho é apresentar a construção de um modelo físico de uma bancada experimental para testes em coletores solares de placa plana. O modelo de exemplo pode ser encontrado em (Sandhu GURVEER; GARCIA, 2014). A bancada é construída para que seja utilizada em futuros experimentos didáticos do próprio laboratório de ciências térmicas da UNESP - FEIS. Assim, a pretensão é que seja de fácil uso e manuseio tanto por docentes quanto pelos próprios discentes.

Inicialmente, avalia-se os principais parâmetros a serem considerados para a construção da bancada. Dentre eles, avaliou-se o custo e a maior possibilidade possível de testes que poderiam ser realizados. Esses parâmetros serão norteadores para o desenvolvimento geométrico da bancada pois a bancada precisa comportar as futuras alterações técnicas e, ao mesmo tempo, possibilitar o uso dos outros experimentos em laboratório.

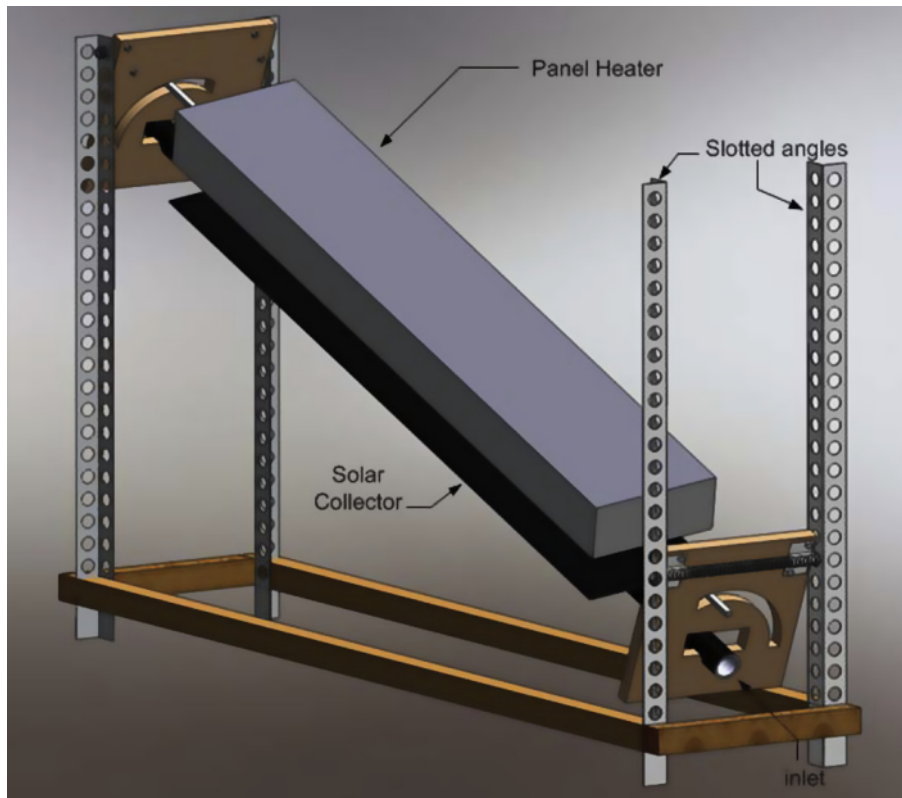
Dado que os recursos destinados ao projeto são escassos, o ponto fundamental é que seja de baixo custo. Dessa forma, inicia-se com a modelagem da bancada em um software 3D, a fim de que o projeto contemple todos os pontos levantados como importantes e saia com medidas exatas, evitando retrabalhos no modelo físico. Com isso, é possível ser objetivo na busca pelos materiais, bem como nas medidas construtivas.

O próximo passo é desenvolver a coleta de dados da bancada, visto que serão utilizados 16 termopares para coletar os dados de temperatura do coletor solar. Embora os termopares não precisem de um tempo de aquisição muito baixo (em milissegundos, por exemplo) é importante para o futuro da bancada que a aquisição possa ser automática, tanto para facilitar a coleta quanto para implementar futuras pesquisas/experimentos envolvendo dados do regime transitório.

Considerando um orçamento mínimo, a ideia inicial é usar a plataforma de prototipagem Arduino. Essa é uma plataforma *opensource* e *openhardware* em C++, que permite a pessoas iniciantes em programação codificar e implementar o código conforme a necessidade. Sendo um microcontrolador imbuído de um microprocessador, o Arduino permite que seja possível controlar diversos dispositivos ao mesmo tempo, e fazer leituras de diversos sensores.

A princípio, a bancada experimental foi projetada a partir do modelo encontrado em (Sandhu GURVEER; GARCIA, 2014). No modelo em discussão, os autores usaram uma bancada com possibilidade de regulação de ângulos, de inserção de diferentes dispositivos passivos para aumento da taxa de transferência de calor e também troca do próprio coletor solar, conforme figura 9.

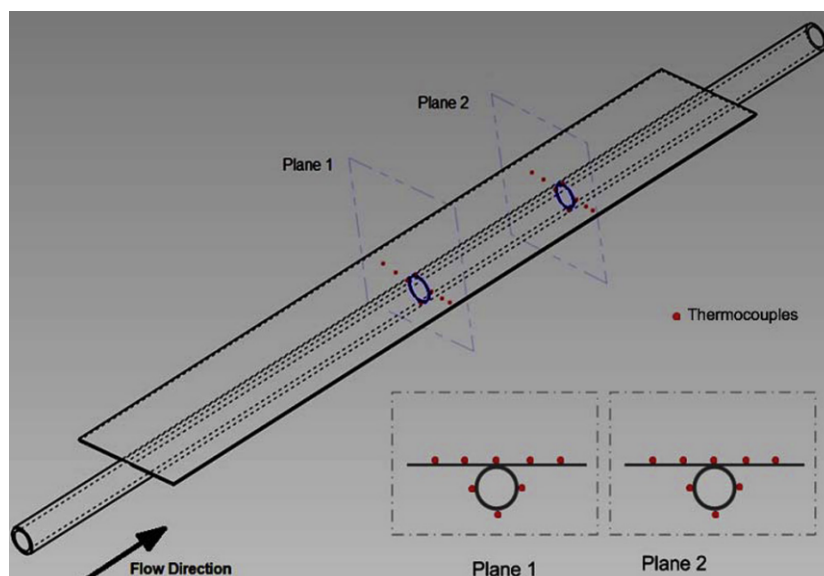
Figura 9 – Modelo para o projeto



Fonte: (Sandhu GURVEER; GARCIA, 2014)

O modelo também conta com o acoplamento de diversos termopares tipo K para medições de temperatura. Um termopar foi colado na entrada do escoamento, e outro na saída. Outros 16 termopares foram colados ao longo do tubo, dispostos em dois planos paralelos entre si e normais ao escoamento, conforme exibido na figura 10.

Figura 10 – Disposição dos termopares

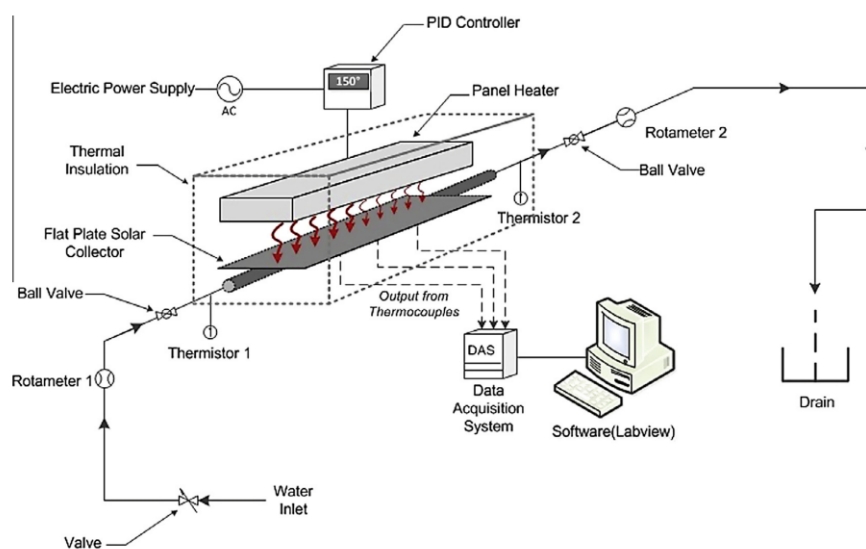


Fonte: (Sandhu GURVEER; GARCIA, 2014)

Para aquisição de dados foi usado o sistema da *Nacional Instruments* (SCXI-1000). Esse sistema é formado por um sistema de aquisição (PCI-6036E), um condicionador de sinais (SCXI 1102) e um terminal (SXCI-1303). Os dados foram adquiridos via LabView®.

O esquemático da montagem é mostrado na figura 11. Conforme é possível ser notado, a temperatura escolhida pelos autores para manter a placa superior aquecida é de 150 °C. Além disso, há uma distância de 25mm entre a superfície irradiadora de calor e o coletor solar teste.

Figura 11 – Esquemático do experimento



Fonte: (Sandhu GURVEER; GARCIA, 2014)

Devido aos custos dos equipamentos e não disponibilidade de informações completas acerca da montagem da referida bancada não foi possível reproduzi-la fidedignamente. Dessa forma, o modelo serviu apenas como base de ideias para que fosse possível desenvolver a bancada deste projeto. O equipamento de aquisição de dados foi substituído, a fonte térmica foi desenvolvida a partir de resistências elétricas e mantas isolantes, e a estrutura foi desenvolvida a base de madeira e aço encontrado nos laboratórios de ciência dos materiais da UNESP - FEIS.

3 Resultados

O projeto inicial foi desenvolvido com base no artigo já citado, e convertido à uma modelagem 3D no software SolidWorks®- *Student license* , adaptado conforme as necessidades do projeto aqui descrito. A princípio, buscou-se atender a alguns requisitos básicos, tais qual:

- Baixo custo
- Possibilidade de regular angulação
- Possibilidade de troca de dispositivos internos aos tubos
- Possibilidade de troca de tubos

Com esses pontos elencados, começou-se a fase de modelagem no software. A princípio, idealizou-se uma estrutura básica de madeira, onde seriam colocadas cantoneiras as quais serviriam de suporte para a estrutura do coletor solar, bem como da fonte de calor. Assim, o dispositivo foi separado em duas partes principais: a estrutura básica e a fonte de calor. A modelagem da base está apresentada conforme figura 12. Desenhos técnicos para construção montagem estão disponíveis ao final do capítulo.

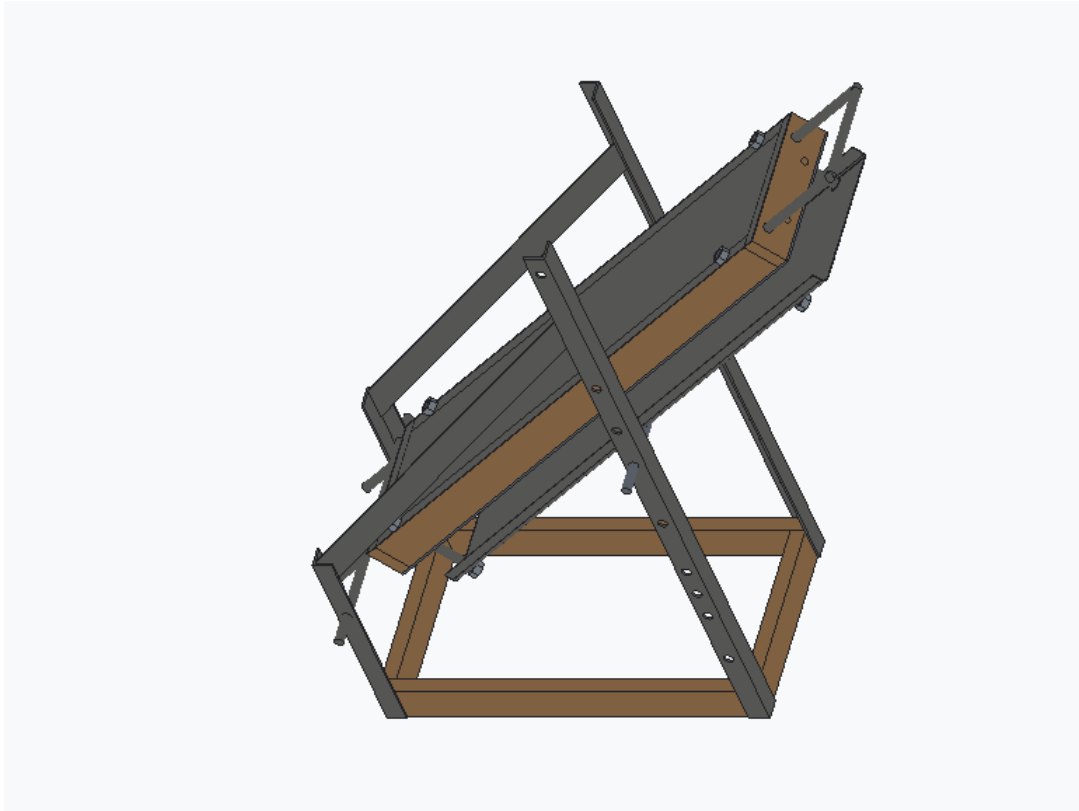
Ela é formada por duas ripas de madeira de 500x50 mm e outras duas de 230x50 mm dispostas em um retângulo. Em seguida, quatro cantoneiras foram parafusadas nos quatro cantos. Todas de uma polegada, duas com comprimento de 900 mm e outras duas com comprimento de 300 mm. Ao final da montagem, notou-se uma fragilidade no projeto pois o peso da fonte térmica fez com que e as cantoneiras flambassem, o que levou à necessidade de reforçar a estrutura com duas barras de ferro soldadas nas laterais.

Já a fonte térmica foi um pouco mais complexa de ser desenvolvida pois precisaria ser leve, de forma que a base pudesse sustentá-la sem maiores problemas, e também pudesse conter as resistências, fiações e manta térmica, resistindo bem à altas temperaturas (100 a 300 °C). Inicialmente, optou-se por uma caixa com laterais e parte superior de madeira, e com uma chapa grossa de ferro de meia polegada na superfície inferior, sendo essa a superfície irradiadora.

No entanto, existia o problema do peso da chapa de aço, inviabilizando o projeto. Buscando recursos dentro da própria universidade, foi disponibilizada uma chapa de alumínio de 3 mm que atendeu a solicitação do projeto, na proporção que o alumínio possui uma condutividade térmica superior a do aço. Para o aço carbono, temos $60,5 \frac{W}{m.K}$ e para o alumínio $237 \frac{W}{m.K}$ (INCROPERA et al., 1996)

Com isso, a fonte irradiadora ficou constituída por uma caixa retangular com laterais de madeira. Para facilitar o acesso às resistências, a parte superior foi feita com uma chapa fina de aço, presa por porcas em uma barra roscada. Por fim, conforme descrito, a parte inferior, superfície irradiadora de calor, é a chapa de alumínio de 3 mm. Após uma série de desenvolvimentos, o modelo final do projeto foi obtido conforme figura 12.

Figura 12 – Base final modelada



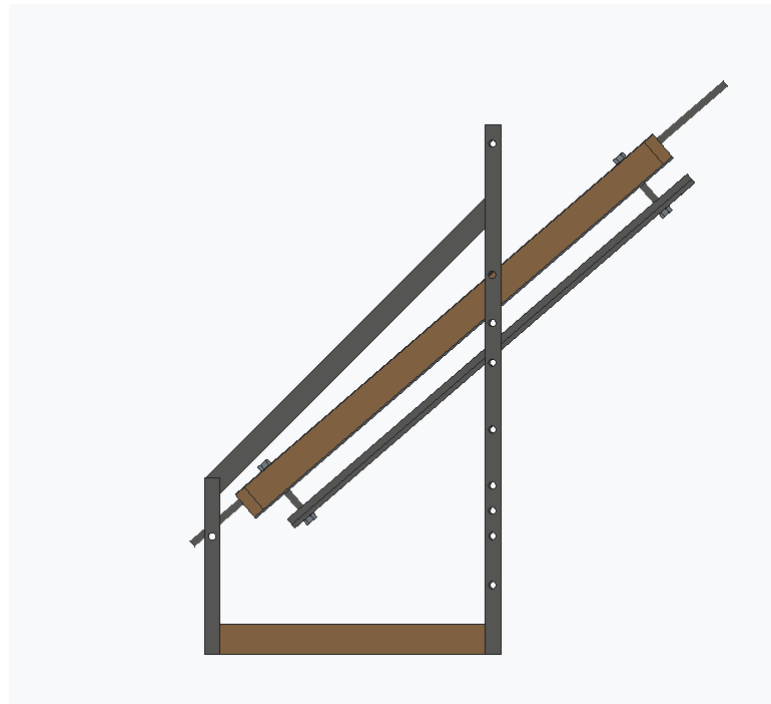
Fonte: Autoria própria

Na lateral, pode-se notar os furos calculados para que o sistema alcance angulações que vão de 0° até 60°, conforme figura 13. A partir da base, as medidas até o topo são conforme desenho técnico.

Materiais usados:

- 2 cantoneiras 1/2"x900 mm
- 2 cantoneiras de 1/2"x300 mm
- 2 ripas de 50x20x500 mm
- 2 ripas de 50x20x230 mm
- 2 ripas de 50x20x760 mm
- 1 barra de 1/2"x350 mm

Figura 13 – Base modelada - vista lateral



Fonte: Autoria própria

A montagem ocorreu na própria oficina da faculdade, onde foi possível cortar as madeiras e furar as cantoneiras. Primeiramente as cantoneiras foram furadas conforme medidas apresentadas anteriormente. Em seguida, as madeiras foram cortadas conforme desenhos técnicos. Em sequência, as cantoneiras foram fixadas às madeiras por meio de parafusos.

Nessa hora, notou-se que as cantoneiras necessitavam de uma restrição a mais de movimento, pois apenas os parafusos laterais não foram suficientes para resistir ao peso da fonte térmica. Assim, no laboratório de soldagem acrescentou-se duas chapas metálicas fixando as cantoneiras.

Conforme citado anteriormente, a construção da fonte absorvedora levou diversas considerações, como o ponto de combustão da madeira, o peso da placa inferior (irradiadora) e também a própria facilidade de movimentação do conjunto para os diferentes ângulos. Ao final, o modelo escolhido foi o apresentado na figura 14.

Os itens usados para a montagem do fonte absorvedora foram:

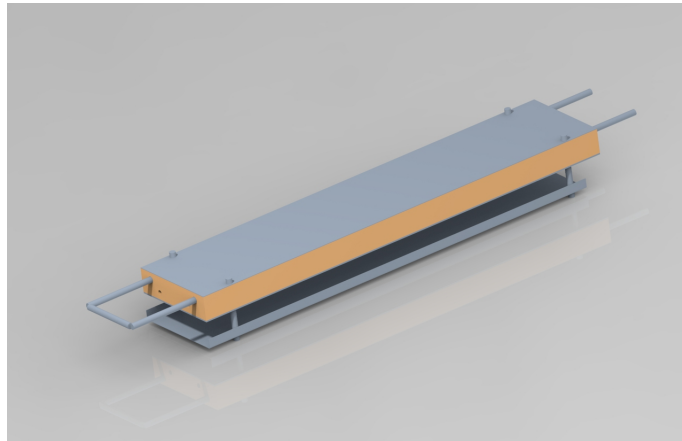
- 1 chapa de Aço 1mm de espessura
- 2 ripas de 5x20x900 mm
- 2 ripas de 5x20x200 mm
- 1 chapa de alumínio 3mm de espessura

- 2 barras de 1/2"x1200 mm
- 1 barra de 1/2"x130 mm
- 1 barra roscada M12

Para a parte interna da fonte térmica foram usados os seguintes itens:

- 2 Resistências Reta Tubular 230v 1900w
- 1 Manta Fibra Cerâmica 1000 X 610 X 25 Mm

Figura 14 – Projeto 3D da fonte térmica



Fonte: Autoria própria

Primeiramente furou-se as madeiras para receber todos os parafusos necessários à montagem da fonte, conforme desenhos técnicos. Além dos furos de montagem, também foi feito dois furos passantes onde ficam as barras roscadas de ajuste da superfície absorvedora. A barra roscada fará o fechamento do conjunto, tampa superior, inferior e o suporte do coletor solar, logo abaixo da superfície irradiadora para que seja possível, por meio de porcas, fazer a regulagem do conjunto. Esse detalhe é importante pois facilita e permite que os tubos do experimento possam ser trocados conforme o objeto a ser estudado.

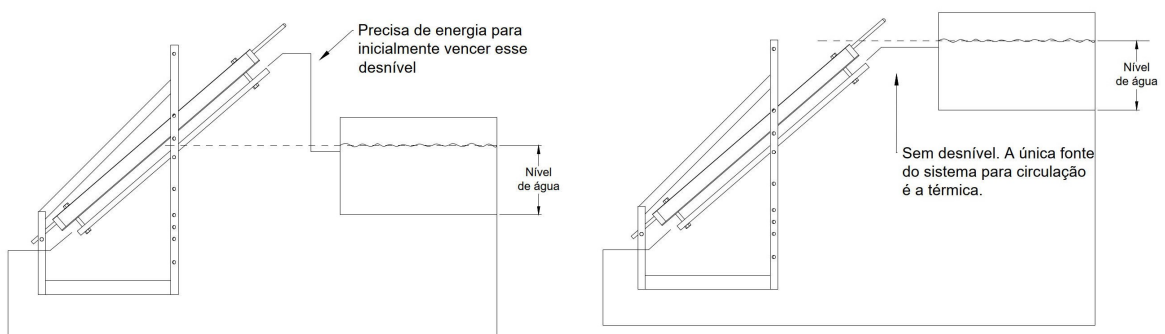
Como fonte de calor, foram usadas as duas resistências de 1900 W distantes 140 mm entre si. Essa distância foi usada para que o aquecimento não ficasse concentrado apenas no centro da superfície irradiadora. A ligação das resistências foi feita em série para que apenas metade da potência seja utilizada, evitando assim que a caixa de madeira fosse danificada de alguma forma por causa do calor. Além disso, um *Variac* foi conectado às resistências a fim de controlar a potência irradiada ao coletor solar, abrindo assim mais oportunidades e variáveis para estudo.

A barra de aço encontrada no laboratório de materiais de construção mecânica era de 2 metros, tendo que ser cortada nas medidas descritas nos desenhos técnicos. Soldou-se

na ponta das barras maiores uma barra curvada para que servisse de apoio para levantar e abaixar a fonte irradiadora acoplada com a superfície absorvedora.

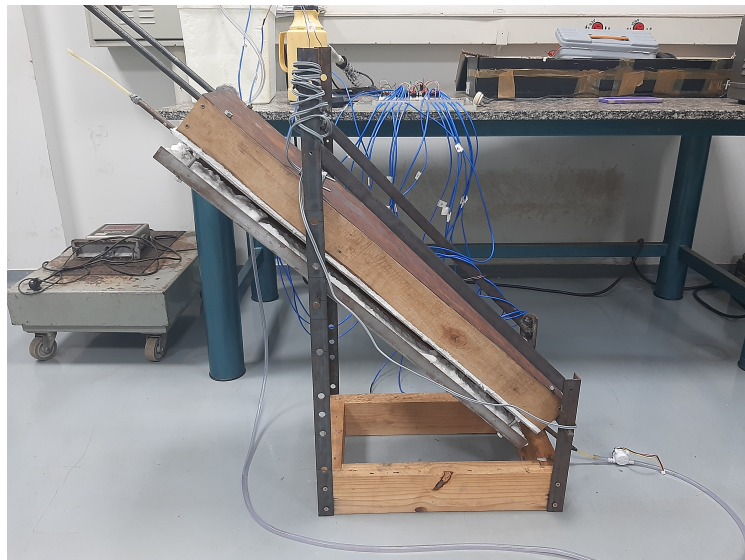
Um coletor solar funciona acoplado a um reservatório térmico, que acumula a água aquecida. Esse reservatório contém uma saída para uso pessoal e outro para ser reabastecido conforme a água quente é usada. Esse reservatório precisa estar acima do nível do coletor solar, para permitir a convecção natural. O ponto máximo, na realidade, é exatamente no ponto de saída do coletor solar. Se ficar abaixo, não há convecção natural visto que a força de empuxo via densidade não é suficiente para fazer a água percorrer o tubo. Se ficar acima, é importante que o nível final de saída do coletor solar seja o mesmo do nível de água do reservatório térmico, senão o sistema não entra em equilíbrio da mesma forma, conforme pode ser apresentado esquematicamente na figura 15. Ao final, a bancada experimental foi construída conforme figura 16

Figura 15 – Impacto do desnível em um sistema termossifão



Fonte: Autoria própria

Figura 16 – Bancada pronta



Fonte: Autoria própria

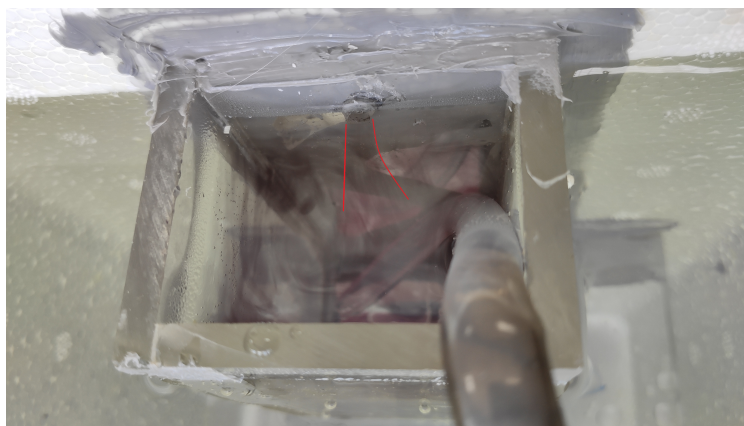
Alguns testes foram realizados para certificar de que a convecção natural estava ocorrendo de fato na bancada. O teste consistiu em conectar as resistências na metade da sua potência nominal (220 V - ligação em série) e observar. Dentro de uma hora foi possível observar temperaturas de até 50 °C na saída do coletor solar, para uma entrada de 28 °C, conforme pode-se observar na figura 17. Para possibilitar a visualização do escoamento da bancada, foi adicionado na entrada da mesma corante da cor preta. Pode-se observar na figura 18 a saída de água quente

Figura 17 – Primeiro teste da bancada - temperaturas antes e depois



Fonte: Autoria própria

Figura 18 – Primeiro teste da bancada - visualização do escoamento

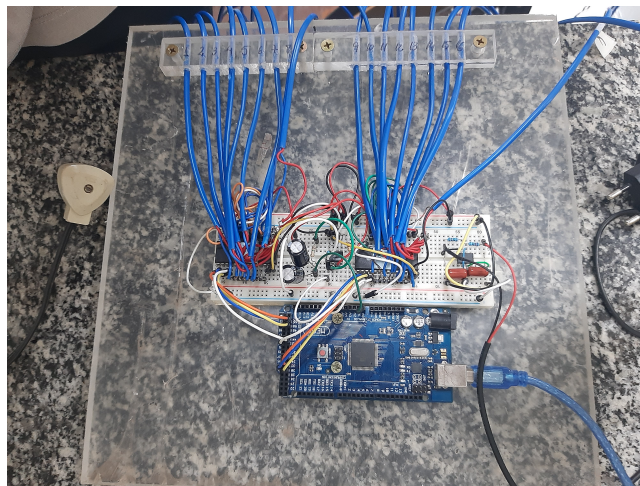


Fonte: Autoria própria

Para aferir as temperaturas, os termopares do tipo K foram construídos dentro do laboratório de transferência de calor e massa da própria universidade. Um rolo de cabo flexível e outro de cabo rígido foram adquiridos pela universidade. Ao todo, foram construídos 20 termopares com o material, cada um deles contendo cerca de 300 milímetros de cabo rígido somados a 1000 milímetros de cabo flexível.

Diante da quantidade de termopares a serem usados para a coleta de temperaturas, fica inviável a leitura pontual de cada um deles. Assim, foi desenvolvido em parceria com o Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS-UNESP um sistema baseado no microcontrolador *opensource* Arduino, que conecta todos os termopares e realiza a leitura individual, salvando os dados em um arquivo de texto para posterior tratamento. O protótipo final ficou conforme figura 19.

Figura 19 – Aquisitor de dados

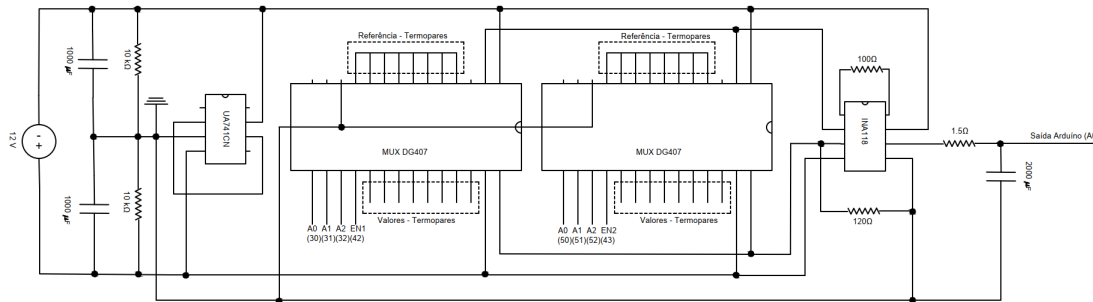


Fonte: Autoria própria

Para a confecção da placa, foram usados os seguintes itens. O circuito com detalhes para os componentes está representado na figura 20

- 1 Arduino ATMEGA 2546
- 2 Capacitores eletrolíticos de 1000 μfarads
- 2 capacitores cerâmicos de 1000 μfarads
- Resistores diversos
- 1 Placa de prototipagem (*protoboard*)
- 1 Amplificador operacional
- 1 Amplificador operacional de instrumentação
- 2 Multiplexadores
- 16 termopares do tipo JK
- 1 placa de acrílico
- *Jumpers*

Figura 20 – Esquema elétrico



Fonte: Autoria própria

O primeiro parâmetro a ser calculado para a confecção da placa de aquisição de dados é o ganho do sistema. Isso por que existe uma distância entre o menor valor que o arduino consegue ler e o valor fornecido pelo termopar. O Arduino é um microcontrolador baseado no CI ATMEGA328P que contém um conversor AD de 1024 bits. Isso significa que existem 1024 posições a serem preenchidas com o limite de tensão permitido pela placa, que é de 5.5 V. Ou seja, de modo geral, a menor leitura permitida pelo arduino mega é:

$$\frac{5.5V}{1024} = 5,3mV \quad (3.1)$$

Enquanto isso, o termopar nos retorna um diferencial de potencial (ddp) na ordem de 0,1 mV, sendo impossível para o arduino captar essa variação. Para que a leitura fosse possível, a ordem de ganho do amplificador deveria ser, no mínimo, de:

$$\frac{5,3mV}{0,1mV} = 53 \quad (3.2)$$

Visando leituras mais fidedignas e entendendo que não ultrapassaríamos o limite de 10 mV (que seriam equivalentes a 5 V na entrada do arduino) foi setado um ganho de 500. Dessa forma, qualquer variação de 0,1 mV resultaria em uma diferença de 50mV, que esta dentro da escala do arduino (5,3 mV).

Calculado o ganho do amplificador, foi preciso projetar como captar a leitura de 16 termopares sem utilizar 16 amplificadores. Além da inviabilidade de montar 16 circuitos amplificadores, existe a questão do preço de cada sistema e também das entradas do Arduino, limitadas a um total de 16 analógicas. Definiu-se o uso de dois multiplexadores de 8 portas, cada um com seu amplificador.

Após calculado os limites de ganho e amplificação do sistema, deu-se início a prototipagem. Ao longo do processo, existiram 3 revisões do sistema. Na primeira versão,

construiu-se com uma alimentação direta de 12 V tanto no amplificador quanto no multiplexador. Os resultados foram insatisfatórios.

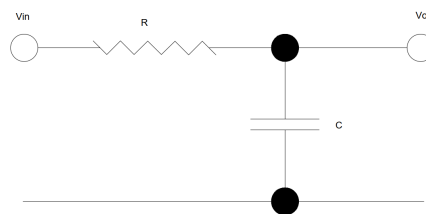
Em seguida, usou-se de um segundo amplificador operacional para desenvolver uma fonte assimétrica, a qual alimentaria todo o sistema. Os resultados foram satisfatórios quando analisados individualmente, seguiu-se um problema de leitura de dados quando as portas dos multiplexadores eram acionadas sequencialmente.

Para contornar o problema, foram desenvolvidos dois filtros, os quais são explicados a seguir. O primeiro filtro foi uma média móvel de valores dentro do código do Arduino. Assim, todas as flutuações foram amenizadas e um resultado mais estável foi obtido, novamente para leituras individuais, de cada porta do multiplexador.

Em seguida, adicionou-se um *delay* ao código do Arduino, para que o mesmo pudesse ter um tempo de conversão dos valores, emissão do resultado, e recepção de novos valores para conversão.

Por fim, um filtro passa-baixa foi adicionado à saída do amplificador. Os filtros passa-baixa são filtros físicos constituídos de um acoplamento resistor-capacitor, conforme exemplificado na figura 21, que permite a passagem apenas de baixas frequências no sistema. Como não havíamos um osciloscópio no laboratório, não foi possível observar a saída das ondas no amplificador e, portanto, calcular de quanto seria a frequência de corte. Experimentalmente, encontrou-se um valor de 53 Hz que supriu as necessidades do sistema. O sistema final ficou conforme figura 22

Figura 21 – Filtro resistor capacitor - Passa baixa



Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Sistema de aquisição de dados pronto



Fonte: Autoria própria

Tabela 1 – Temperaturas do banho térmico

ID	Temperatura (°C) ± 0,5
0	28.0
1	48.0
2	57.5
3	59.5
4	62.5
5	64.5
6	66.5
7	68.0
8	72.0
9	75.0
10	77.0
11	81.5
12	85.5
13	90.0
14	93.5
15	96.0
16	99.0

Fonte: Autoria própria

Findo o processo de desenvolvimento do coletor de dados, deu-se início à calibração dos termopares. Para isso, um banho térmico foi realizado, variando a temperatura do banho, conforme tabela 1. Para cada valor de temperatura, 10 valores analógicos foram coletados, e com eles um tratamento estatístico foi dado, a fim de calcularmos o erro presente nas medidas, conforme apresentado nas tabelas 2 e 3.

Para isso, os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Notebook;
- Termômetro de mercúrio marca Incoterm ;
- Equipamento de banho térmico da marca MLW, - 13892520 - 1,72 kW

Com os valores aquisitados, foi possível, por meio de uma regressão linear, obter as curvas de cada termopar. A regressão linear foi realizada por meio do pacote *Seaborn*, dentro do ambiente *Jupyter - Anaconda*. O código encontra-se em anexo. Os valores passados foram em pontos cartesianos (x_i, y_i) onde cada valor x_i representa uma leitura da bancada e os valores y_i a respectiva temperatura. Assim, foi possível obter os coeficientes da reta representada pela equação 3.3 apresentados na tabela 4

$$y = a.x + b \tag{3.3}$$

Tabela 2 – Dados aquistados pelo Arduino, temperaturas ID 0 a 8

	\bar{T}_0	σ_{T_0}	\bar{T}_1	σ_{T_1}	\bar{T}_2	σ_{T_2}	\bar{T}_3	σ_{T_3}	\bar{T}_4	σ_{T_4}	\bar{T}_5	σ_{T_5}	\bar{T}_6	σ_{T_6}	\bar{T}_7	σ_{T_7}	\bar{T}_8	σ_{T_8}
0	106.0	0.0	190.5	0.8	223.8	0.8	229.8	1.7	238.7	0.9	246.5	0.5	257.4	0.5	269.0	0.0	280.0	0.0
1	109.2	0.4	191.8	1.2	226.8	1.1	232.1	1.1	240.9	0.9	248.8	0.4	259.5	0.5	271.0	0.0	282.6	0.5
2	110.2	0.6	196.0	1.2	229.5	1.9	236.6	1.2	245.8	0.9	253.2	0.4	264.7	0.5	275.5	0.5	287.0	0.0
3	110.8	0.4	196.4	1.4	229.6	1.6	236.6	0.8	245.6	0.7	253.0	0.0	264.1	0.3	275.2	0.6	286.9	0.6
4	111.2	0.4	198.9	1.0	235.2	2.3	239.2	1.0	248.2	1.0	255.8	0.4	266.0	0.0	277.4	0.5	288.6	0.5
5	114.8	0.4	199.1	1.4	232.5	1.0	239.2	1.0	248.9	0.6	256.8	0.4	267.2	0.4	278.7	0.5	288.7	0.5
6	115.9	0.3	198.1	1.3	230.5	1.1	237.8	1.2	248.4	0.8	255.2	0.4	266.9	0.3	277.1	0.3	289.0	0.0
7	109.7	0.5	204.1	1.0	236.2	0.9	242.5	0.5	253.3	0.9	260.2	0.4	271.2	0.6	281.9	0.3	293.7	0.5
8	105.0	0.4	185.8	0.4	207.1	1.7	222.3	1.3	237.6	0.7	244.8	0.4	256.7	0.5	266.8	0.4	278.9	0.3
9	102.0	0.0	190.1	0.3	210.3	1.6	226.7	1.8	242.4	0.5	249.8	0.4	260.8	0.4	271.2	0.4	284.0	0.0
10	106.0	0.0	189.6	0.5	211.2	1.4	225.7	1.4	242.2	0.7	249.2	0.4	260.3	0.5	271.3	0.5	282.9	0.3
11	109.2	0.4	192.6	0.7	204.5	2.0	224.4	3.9	244.4	0.5	251.6	0.5	262.6	0.5	273.1	0.3	285.9	0.3
12	114.5	0.5	193.5	0.5	213.8	2.4	229.9	1.4	246.0	0.0	253.9	0.3	264.5	0.5	275.7	0.5	288.0	0.0
13	115.0	0.0	193.5	0.7	217.4	1.7	232.3	1.2	247.1	0.5	254.9	0.3	265.8	0.4	276.6	0.5	289.1	0.3
14	116.0	0.0	195.6	0.8	220.0	0.8	233.1	1.1	247.8	0.4	255.1	0.3	266.7	0.6	277.7	0.5	289.3	0.5
15	117.0	0.0	194.7	0.5	220.1	1.6	232.8	0.9	247.5	0.5	255.5	0.7	266.2	0.4	276.6	0.5	289.3	0.5

Tabela 3 – Dados aquistados pelo Arduino, temperaturas ID 9 a 16

	\bar{T}_9	σ_{T_9}	\bar{T}_{10}	$\sigma_{T_{10}}$	\bar{T}_{11}	$\sigma_{T_{11}}$	\bar{T}_{12}	$\sigma_{T_{12}}$	\bar{T}_{13}	$\sigma_{T_{13}}$	\bar{T}_{14}	$\sigma_{T_{14}}$	\bar{T}_{15}	$\sigma_{T_{15}}$	\bar{T}_{16}	$\sigma_{T_{16}}$
0	289.2	0.4	302.1	0.7	319.1	1.3	342.4	0.8	365.6	1.2	381.7	0.5	394.5	0.5	406.5	1.2
1	291.3	1.4	303.2	0.8	319.8	1.7	344.7	1.3	367.2	2.0	383.5	0.5	395.6	0.5	407.5	1.0
2	296.5	0.7	308.2	1.1	325.3	1.3	349.3	1.3	371.1	1.4	386.3	0.5	396.9	0.6	409.0	1.0
3	296.5	0.5	307.8	0.7	325.2	1.5	349.0	1.4	369.9	0.8	386.8	0.7	400.2	0.4	412.0	0.0
4	297.6	0.5	309.8	1.2	327.8	1.4	349.9	1.1	371.7	1.3	388.8	0.7	402.4	0.5	414.9	0.6
5	298.8	0.5	311.1	0.8	329.0	1.2	351.9	1.1	372.9	1.4	390.3	0.6	403.8	0.4	415.3	0.5
6	298.8	0.9	310.7	1.0	328.3	1.6	352.2	1.2	372.7	1.3	390.0	0.8	403.0	0.0	415.7	0.6
7	304.1	0.5	315.1	1.0	333.3	1.1	356.8	1.3	378.3	1.0	395.0	0.0	408.0	0.0	420.5	0.5
8	290.3	0.9	299.4	0.7	316.4	1.5	341.1	1.0	360.3	0.7	378.7	0.5	392.8	0.4	403.0	1.2
9	294.1	1.0	304.3	1.0	321.4	0.8	344.8	1.1	364.2	0.6	382.9	0.3	397.0	0.0	407.9	0.3
10	293.9	0.7	304.1	0.8	322.4	1.0	344.8	0.7	364.3	0.5	382.5	0.5	396.2	0.4	407.8	0.4
11	296.6	0.7	306.1	0.8	324.5	0.5	346.9	1.1	366.7	0.5	384.5	0.5	398.8	0.4	408.8	0.4
12	298.1	0.5	307.9	1.1	326.5	1.2	348.5	0.8	368.4	0.5	386.8	0.4	400.4	0.5	411.3	0.5
13	300.5	0.7	309.1	1.1	327.6	1.3	349.9	1.1	369.6	0.5	388.0	0.0	401.7	0.5	412.5	0.8
14	300.8	0.6	310.3	1.3	328.6	1.3	351.0	1.2	369.2	0.7	388.3	0.5	402.4	0.5	413.2	0.4
15	299.3	0.5	308.7	0.9	326.9	1.3	349.7	0.9	369.8	0.5	386.6	0.5	401.5	0.5	413.1	0.5

Tabela 4 – Coeficientes da reta

	a	b
Termopar 0	0,2327	5,7093
Termopar 1	0,2336	5,0195
Termopar 2	0,2347	3,7676
Termopar 3	0,2329	4,2641
Termopar 4	0,2330	3,6853
Termopar 5	0,2330	3,4775
Termopar 6	0,2326	3,7385
Termopar 7	0,2287	3,8227
Termopar 8	0,2307	7,3669
Termopar 9	0,2283	6,9364
Termopar 10	0,2295	6,5709
Termopar 11	0,2273	6,8562
Termopar 12	0,2309	5,1872
Termopar 13	0,2310	4,8786
Termopar 14	0,2320	4,4026
Termopar 15	0,2331	4,2094

Fonte: Autoria própria

A ideia principal da bancada é que seja de fácil acesso e uso por todos os discentes e docentes do campus de Ilha Solteira. Dessa forma, para que a leitura dos dados fosse simplificada, foi escrito um programa no ambiente *IDE Arduino* que fizesse a leitura dos valores e exportasse serialmente, para que outro software desenvolvido no ambiente *Processing* fizesse a leitura dos mesmos valores e salvasse em um arquivo de texto. Esquemáticamente, a bancada funciona conforme figura 23

Figura 23 – Esquemático geral da bancada pronta



Fonte: Autoria própria

Os códigos implementados tanto em Arduino, quanto no processing (C++), encontram-se no anexo. Primeiramente um código foi escrito para que os termopares fossem calibrados. O software recebe o *input* do usuário da temperatura dada pelo termômetro durante a calibração. Capta a quantidade de dados que o usuário acha interessante para o posterior estudo estatístico e continua nesse fluxo até que o usuário aperte a tecla de terminar o processo. O segundo programa desenvolvido, conta com as equações da reta já implementadas, e retorna as temperaturas lidas por cada termopar. É importante notar

que ambos os programas salvam os arquivos na pasta em que estão sendo executados, como um arquivo de texto. As imagens 24 e 25 mostram os programas em funcionamento. Os códigos também se encontram anexados.

Figura 24 – Software para calibração dos termopares

```

Calibrar_Termopares
Para adicionar temperatura de referência, digite-a e pressione enter.
Se desenha encerrar o programa, pressione tab.

Última temperatura adicionada: 28□□

Últimos valores recebidos do arduino:
T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15
102,95,92,89,87,86,84,83,82,81,80,79,79,78,78,77,
179,172,168,166,163,161,160,158,157,156,155,154,153,152,152,

```

Fonte: Autoria própria

Figura 25 – Software para coletar temperaturas

```

Obter_Temperaturas
Se desenha encerrar o programa, pressione tab.

Últimos valores recebidos do arduino, em milivolts:
T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15
101,94,91,89,87,86,84,83,82,82,81,80,79,78,78,77,
179,172,168,165,163,161,159,157,156,155,155,154,154,154,153,153,
Em temperatura:
47,357 45,203 43,196 42,688 41,666 40,994 40,725 39,735
43,360 42,321 42,141 41,867 40,748 40,454 39,896 39,876

```

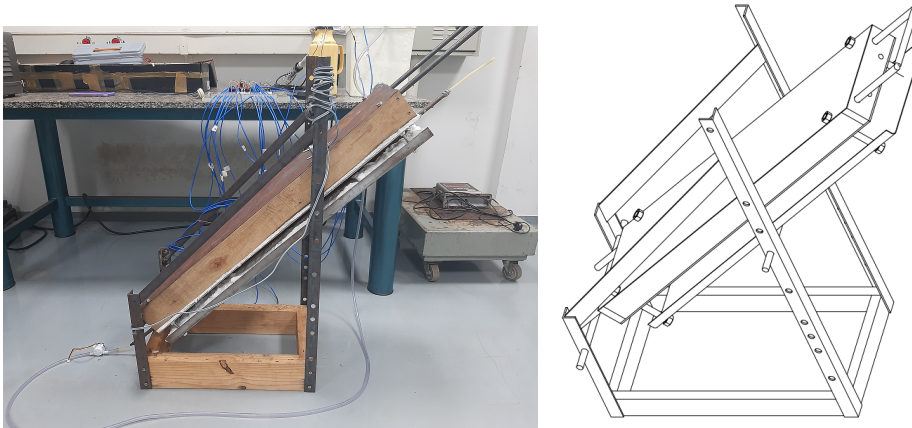
Fonte: Autoria própria

Como é possível ser notado, a construção da bancada reuniu conhecimentos apresentados ao longo de toda a graduação. Foi usado da Resistência dos Materiais para modelagem da bancada, Transferência de Calor e Massa para entender a fenomenologia da convecção natural, e não menos importante, Ciência da Computação e Eletrônica Básica para desenvolvimento do aquisitor de dados.

Findo o processo, há agora um equipamento preparado para exercer a função não só de pesquisa para a UNESP, mas também didática para os laboratórios de Transferência de

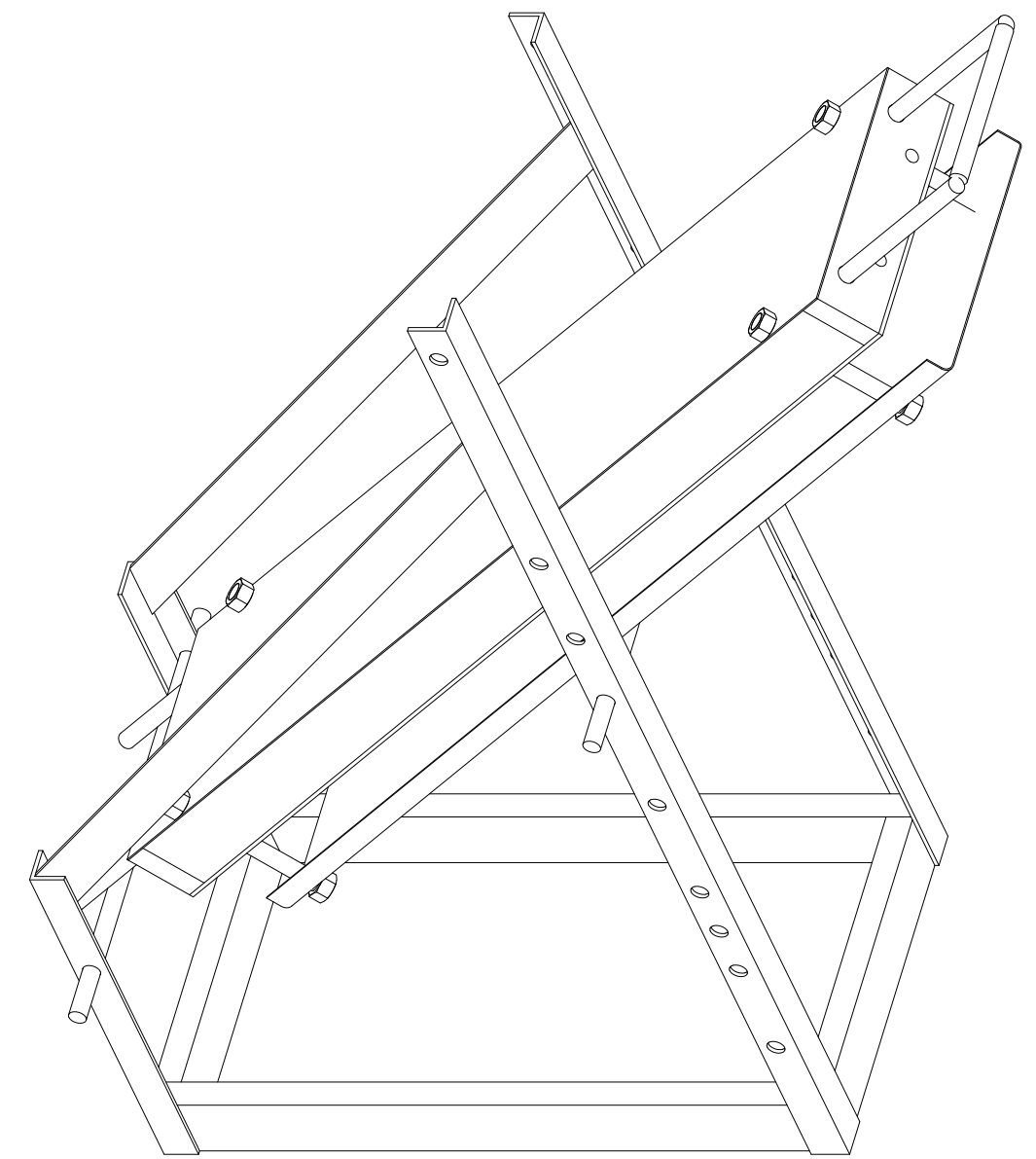
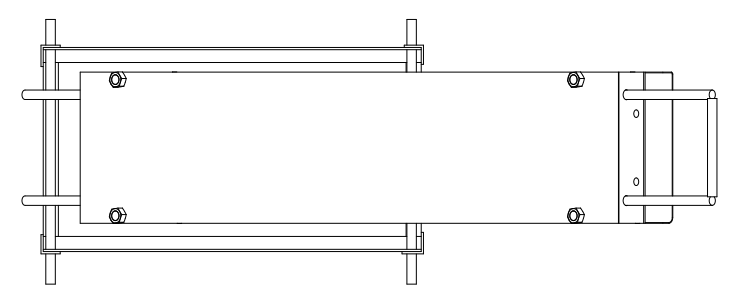
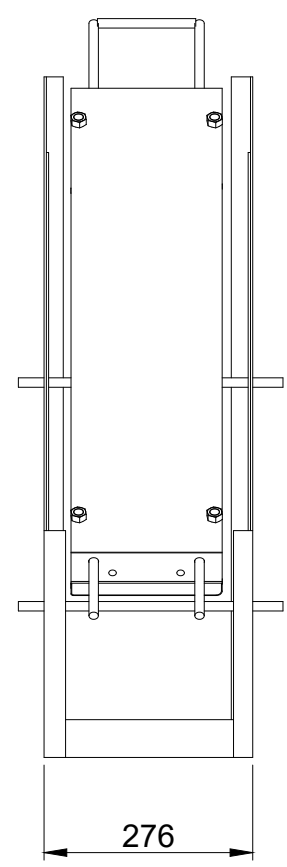
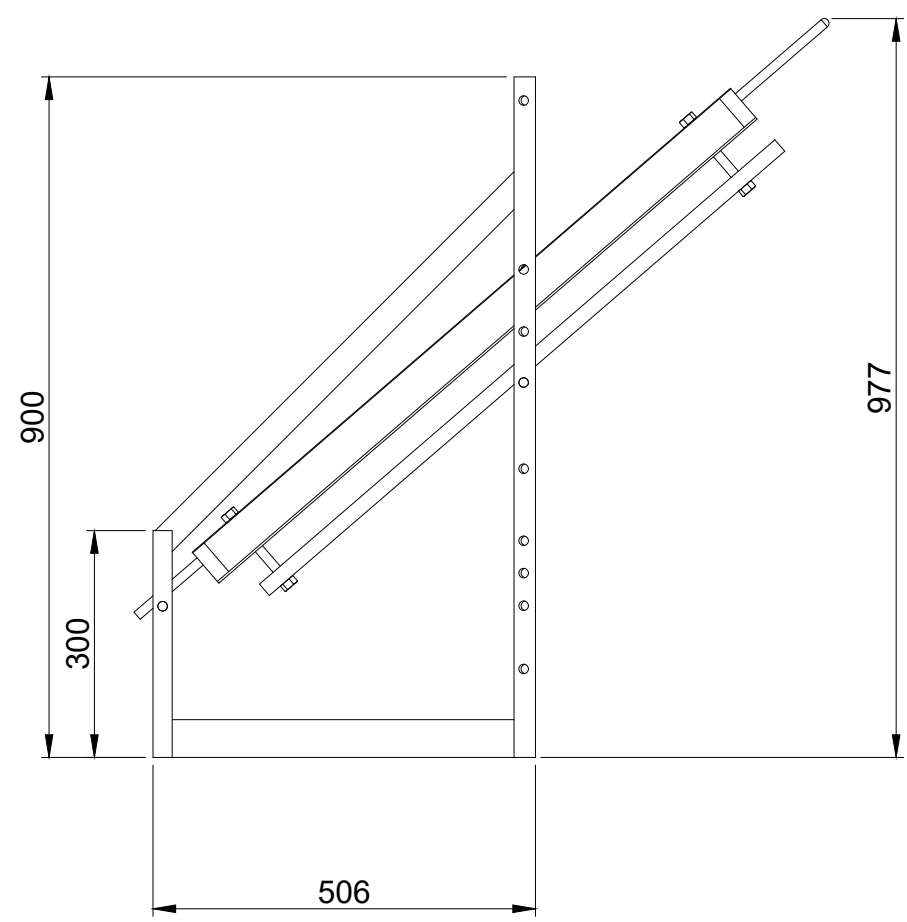
Calor e Massa, dando sentido à sua construção. Como próximos passos, ainda será preciso corrigir alguns pontos como por exemplo a fragilidade do reservatório térmico, e a leitura do fluxo de água. Apresenta-se na figura 26 a comparação entre o modelo 3D desenvolvido computacionalmente e a bancada experimental finalizada, a título de comparação entre o projeto 3D e o protótipo construído. Apresenta-se também os desenhos técnicos para construção do projeto.

Figura 26 – Comparação entre o projeto e a bancada finalizada



Fonte: Autoria própria

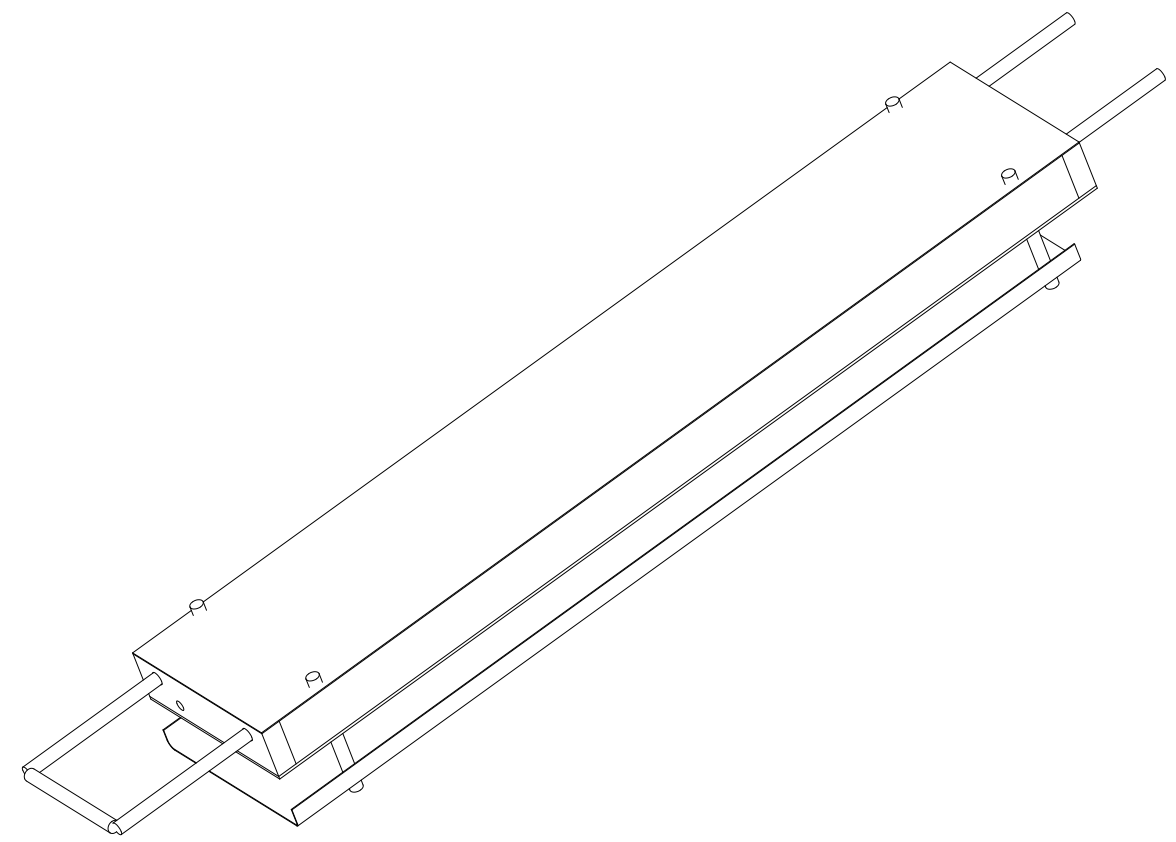
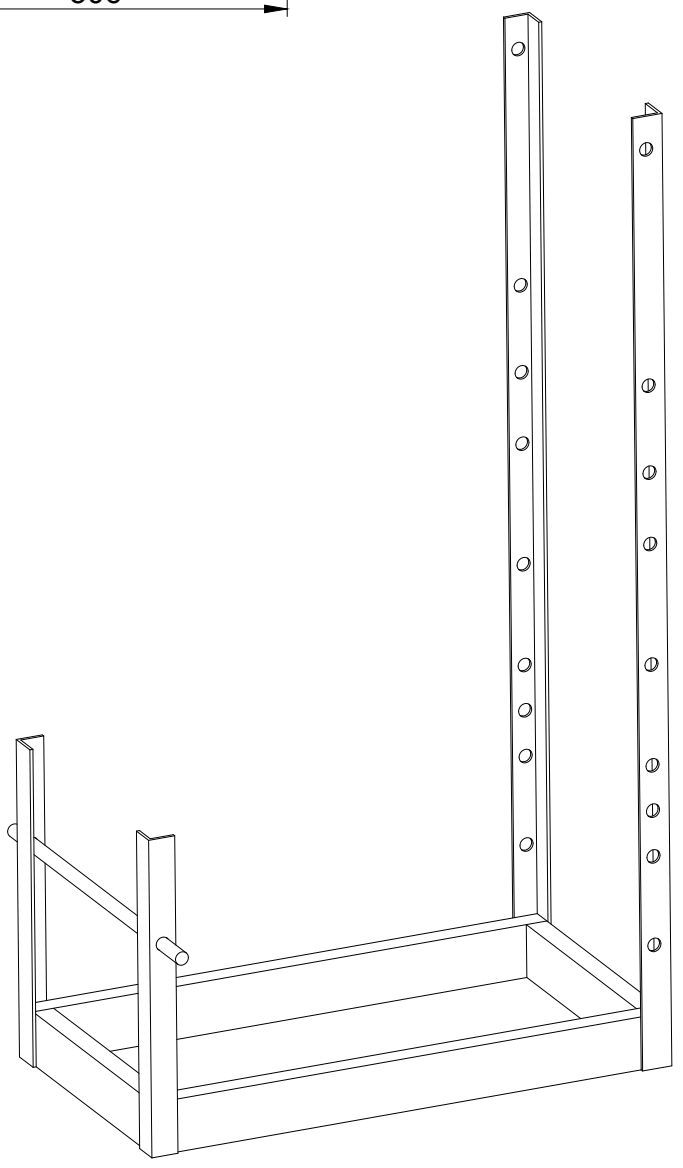
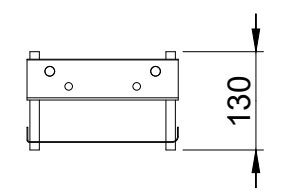
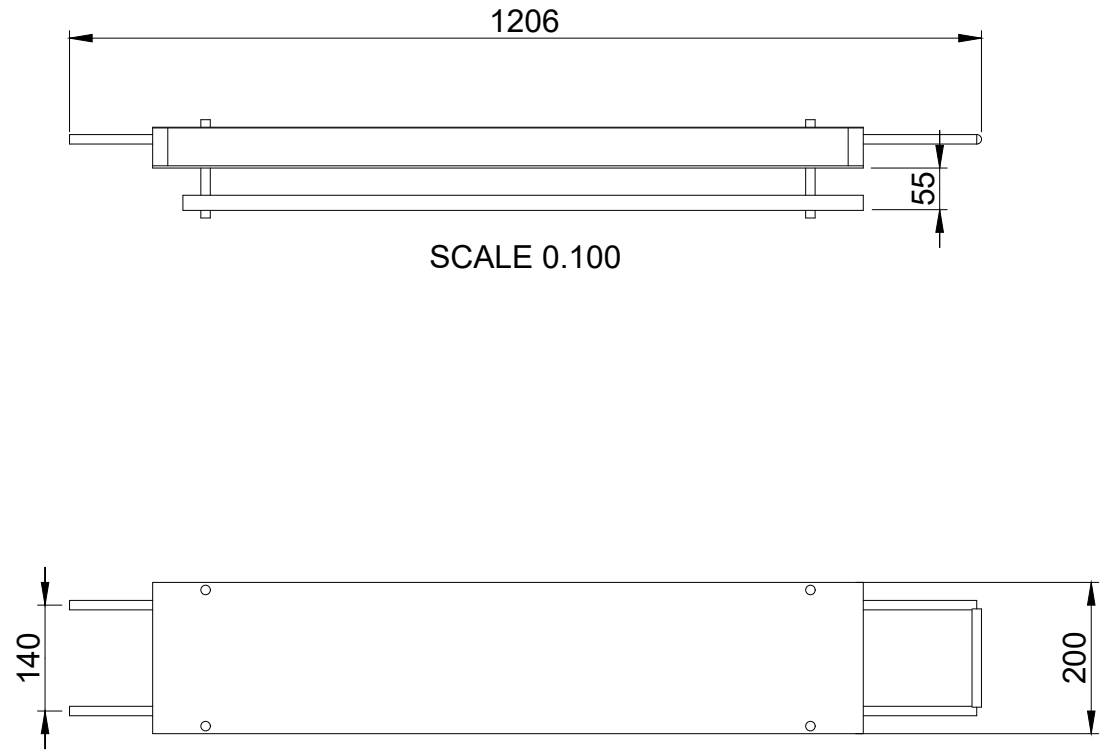
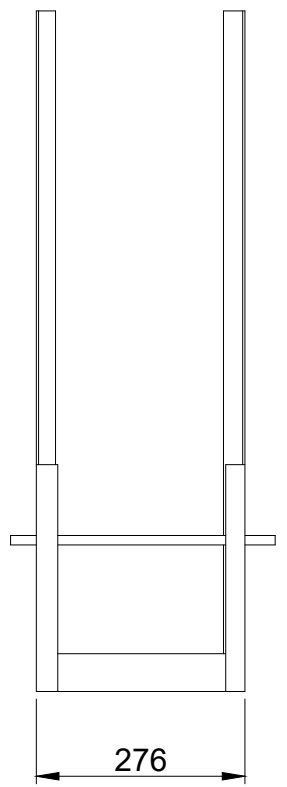
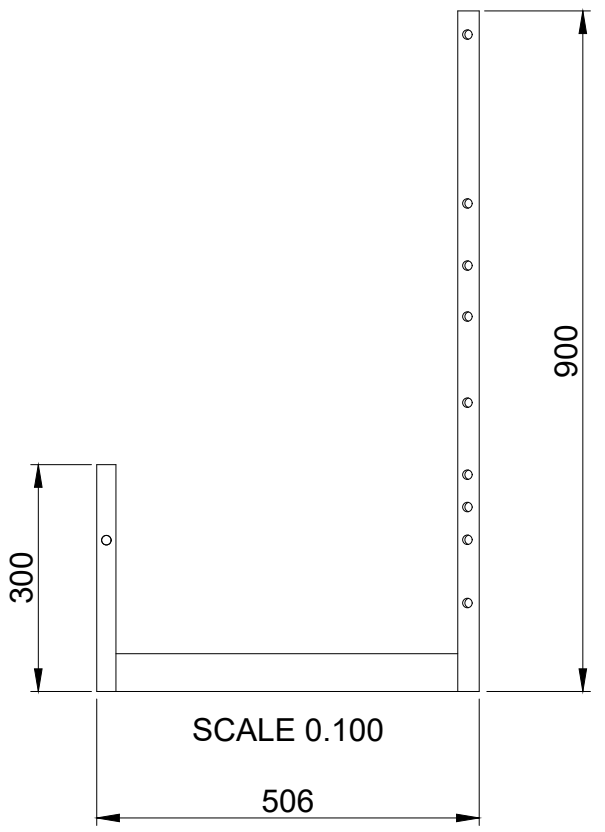
1 2 3 4 5 6 7 8



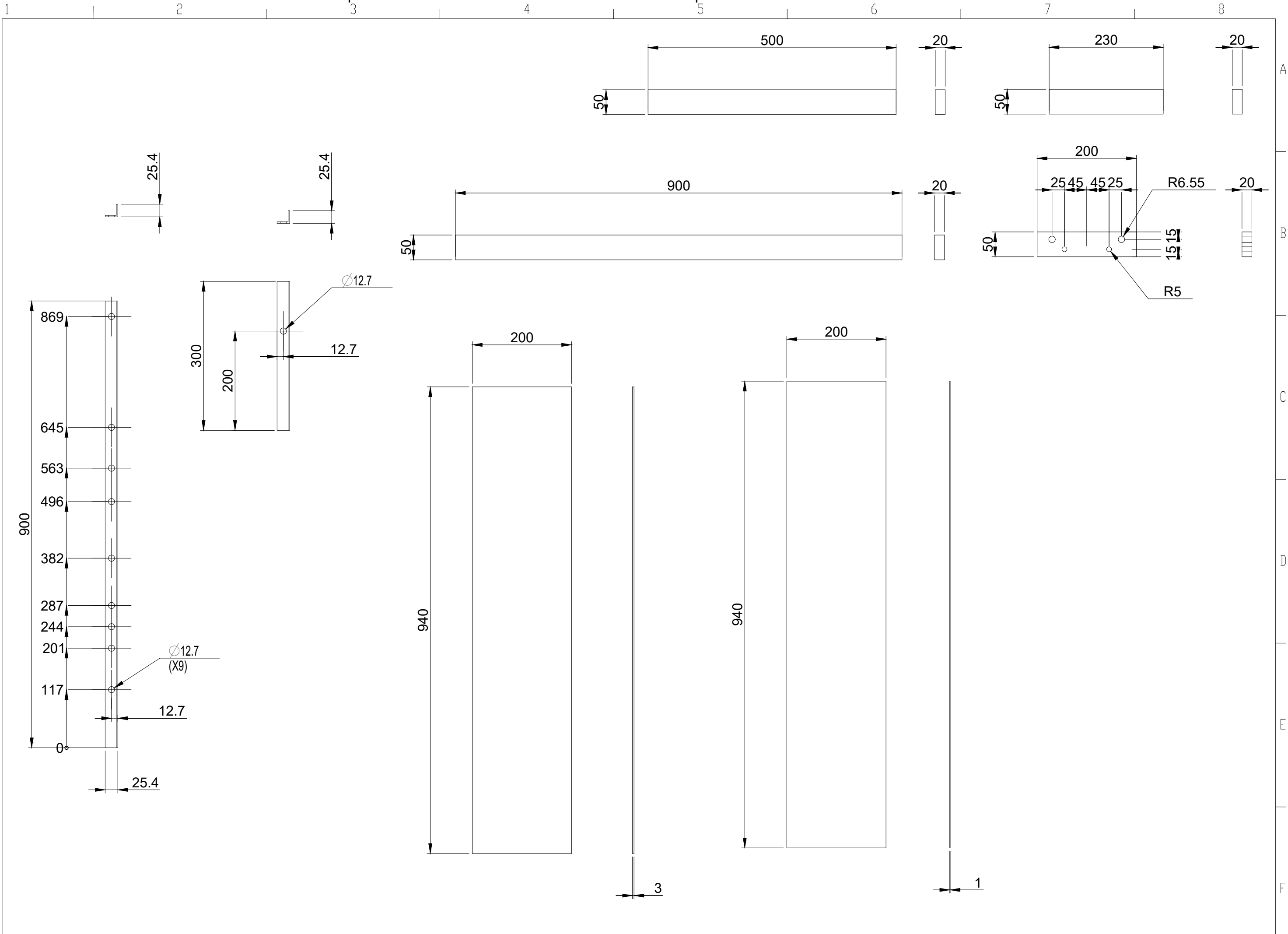
SCALE 0.200

A
B
C
D
E
F

1 2 3 4 5 6 7 8



A
B
C
D
E
F



4 Conclusão

A princípio, o projeto nasceu como uma iniciação científica, que se desdobrou em um Trabalho de Conclusão de Curso. Ao longo do processo, muitos desafios. Construir uma bancada experimental do zero, desenvolver um protótipo funcional de um coletor solar de placa plana, dimensionar o projeto de forma a ser regulável conforme a necessidade de futuros experimentos, construir termopares, sistemas de aquisição, coletar os dados... Desenvolve-se um projeto interdisciplinar, mesclando conhecimento não só do campo da engenharia mecânica, como também da engenharia elétrica.

Como resultado desse trabalho, há uma bancada experimental pronta, na qual um fluido (no estudo em questão, água) a uma entrada de 28 °C, passando pela fonte de calor irradiadora a 13,2kW/m², sai do coletor a 50 °C. Com base no exposto, é possível inferir que os testes iniciais da bancada foram promissores. Houve resultados consistentes da convecção natural, e o sistema de aquisição de dados funcionou nos testes preliminares. Assim, para os próximos passos:

- Corrigir o sistema de armazenamento de água, fazendo uso de materiais mais resistentes
- Implementar o medidor de vazão
- Rodar testes a 110 V
- Rodar testes a 220 V
- Rodar testes em diferentes angulações
- Rodar testes com diferentes tubos

Referências

ATLAS, G. S. *Global Solar Atlas*. 2022. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map?c=37.954593,104.201486,4&r=CHN>>. Acesso em: 07 Set 2022. Citado na página 17.

COMPANY, S. E. P. *Solar Power Advantages and Disadvantages*. 2022. Wiki do abnTeX2. Disponível em: <<https://www.sepco-solarlighting.com/blog/solar-power-advantages-and-disadvantages>>. Acesso em: 18 Nov 2022. Citado na página 21.

DORNELLES, K.; CARAM, R.; SICHIERI, E. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. *Paranoá*, p. 55–64, 09 2014. Citado na página 21.

ENERGY, S. *Descarbonização*. 2022. Wiki do abnTeX2. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/br/pt/empresa/sustentabilidade/prioridade-descarbonizacao.html>>. Acesso em: 01 Mai 2022. Citado na página 17.

EXAME. *Pela primeira vez, energia solar no Brasil supera hidrelétrica de Itaipu*. 2022. Wiki do abnTeX2. Disponível em: <<https://exame.com/esg/pela-primeira-vez-energia-solar-no-brasil-supera-hidreletrica-de-itaipu/>>. Acesso em: 27 Ago 2022. Citado na página 17.

GARCÍA, A.; MARTIN, R. H.; GARCÍA, J. P. Experimental study of heat transfer enhancement in a flat-plate solar water collector with wire-coil inserts. *Applied Thermal Engineering*, v. 61, n. 2, p. 461–468, 2013. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113005528>>. Citado na página 23.

GARCÍA, A.; VICENTE, P. G.; VIEDMA, A. Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes at different prandtl numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 48, n. 21, p. 4640–4651, 2005. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931005003352>>. Citado na página 23.

HIDREL. *7 boas práticas com aquecedor solar*. 2021. [Online; accessed 5-março-2023]. Disponível em: <<https://www.hidrel.net.br/7-boas-praticas-com-aquecedor-solar/>>. Citado na página 18.

INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. [S.l.]: Wiley New York, 1996. v. 6. Citado na página 29.

MARTINS, F. R. et al. Atlas brasileiro de energia solar 2. Inpe, 2017. Citado na página 17.

ONU. *Objetivos de desenvolvimento sustentável*. 2022. Wiki do abnTeX2. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 01 Mai 2022. Citado na página 17.

PRESSE, F. *Em dez anos, energias renováveis quadruplicaram no mundo*. 2022. Wiki do abnTeX2. Disponível em: <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/09/05/em-dez-anos-energias-renovaveis-quadruplicaram-no-mundo.ghtml>>. Acesso em: 01 Mai 2022. Citado na página 17.

RAINIERI, S.; PAGLIARINI, G. Convective heat transfer to temperature dependent property fluids in the entry region of corrugated tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 45, n. 22, p. 4525–4536, 2002. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931002001564>>. Citado na página 24.

RODRIGUES, D.; MATAJS, R. Introdução ao sistema de aquecimento solar. *Vitae Civilis, Ekos Brasil, São Paulo*, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

SALVIANO LEANDRO, f. A. Intensificação da transferência de calor em coletor solar de placa plana através de gerador de vórtice longitudinal do tipo delta. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, p. 10, 2018. Citado na página 23.

Sandhu GURVEER, K. S.; GARCIA, A. Experimental study on the combined effects of inclination angle and insert devices on the performance of a flat-plate solar collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 1, n. 71, p. 251–263, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 18, 25, 26 e 27.

WONGCHAREE, K.; EIAMSA-ARD, S. Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through the round tubes inserted with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 38, n. 3, p. 348–352, 2011. ISSN 0735-1933. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193310002915>>. Citado na página 22.

Apêndices

APÊNDICE A – Código Arduino

```

1  /*
2  As portas enable dos dois multiplexadores estao na porta 53 do
   arduino mega
3  A0 A1 A2 do primeiro multiplexador sao respectivamente as portas
   50 51 52
4  A0 A1 A2 do segundo multiplexador so respectivamente as portas 30
   31 32
5  */
6
7  // =====
8  // --- Prototipo da Funcao para filtro de media movel ---
9  long moving_average();
10 long moving_average1();
11 long moving_average2();
12 long moving_average3();
13 long moving_average4();
14 long moving_average5();
15 long moving_average6();
16 long moving_average7();
17 long moving_average8();
18 long moving_average9();
19 long moving_average10();
20 long moving_average11();
21 long moving_average12();
22 long moving_average13();
23 long moving_average14();
24 long moving_average15();
25
26
27 // =====
28 // --- Constantes Auxiliares ---
29 #define n 10 //numeros de pontos da media movel
30 #define m 2 //numeros de circuitos amplificadores
31
32 // =====
33 // --- Variaveis Globais ---
34 float termopar,
35        termopar1,

```

```
36         termopar2 ,
37         termopar3 ,
38         termopar4 ,
39         termopar5 ,
40         termopar6 ,
41         termopar7 ,
42         termopar8 ,
43         termopar9 ,
44         termopar10 ,
45         termopar11 ,
46         termopar12 ,
47         termopar13 ,
48         termopar14 ,
49         termopar15;
50
51
52 // =====
53 // vetores para as medias moveis
54 int     numbers [n];
55 int     numbers1 [n];
56 int     numbers2 [n];
57 int     numbers3 [n];
58 int     numbers4 [n];
59 int     numbers5 [n];
60 int     numbers6 [n];
61 int     numbers7 [n];
62 int     numbers8 [n];
63 int     numbers9 [n];
64 int     numbers10 [n];
65 int     numbers11 [n];
66 int     numbers12 [n];
67 int     numbers13 [n];
68 int     numbers14 [n];
69 int     numbers15 [n];
70
71 int     resultados [16]; // vetor resultados
72
73 // =====
74 // Variaveis para as portas do arduino
75 int enable1 = 42;
76 int enable2 = 43;
77
```

```
78 int A0_1 = 50;
79 int A1_1 = 51;
80 int A2_1 = 52;
81
82 int A0_2 = 30;
83 int A1_2 = 31;
84 int A2_2 = 32;
85
86 int amp1 = A0;
87 int amp2 = A0;
88
89
90 // =====
91 // --- Configuracoes Iniciais ---
92 void setup() {
93     // initialize serial communication at 9600 bits per second:
94     Serial.begin(9600);
95     pinMode(A0_1, OUTPUT);
96     pinMode(A1_1, OUTPUT);
97     pinMode(A2_1, OUTPUT);
98
99     pinMode(A0_2, OUTPUT);
100    pinMode(A1_2, OUTPUT);
101    pinMode(A2_2, OUTPUT);
102
103    pinMode(enable1, OUTPUT);
104    pinMode(enable2, OUTPUT);
105    digitalWrite(enable1, 1);
106    digitalWrite(enable2, 0);
107
108    pinMode(amp1, INPUT);
109    pinMode(amp2, INPUT);
110
111
112    digitalWrite(A0_1, 1);
113    digitalWrite(A1_1, 0);
114    digitalWrite(A2_1, 0);
115
116    digitalWrite(A0_2, 0);
117    digitalWrite(A1_2, 0);
118    digitalWrite(A2_2, 0);
119
```

```
120 Serial.println("T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10,
    T11, T12, T13, T14, T15");
121
122 }
123 // =====
124 // --- Loop Infinito ---
125 void loop() {
126     for( int k = 0; k <= 16; k++ ){
127         if (k <= 7){
128
129             digitalWrite(enable1, 1);
130             digitalWrite(enable2, 0);
131             delay(250);
132         }
133         else
134         {
135             digitalWrite(enable1, 0);
136             digitalWrite(enable2, 1);
137             delay(250);
138         }
139
140         switch (k) {
141
142         case 0:
143             digitalWrite(A0_1, 0);
144             digitalWrite(A1_1, 0);
145             digitalWrite(A2_1, 0);
146             delay(250);
147
148             termopar = analogRead(amp1);
149             resultados[0] = moving_average();
150
151             break;
152         case 1:
153
154             digitalWrite(A0_1, 1);
155             digitalWrite(A1_1, 0);
156             digitalWrite(A2_1, 0);
157             delay(250);
158
159             termopar1 = analogRead(amp1);
160             resultados[1] = moving_average1();
```

```
161     break;
162
163     case 2:
164
165         digitalWrite(A0_1, 0);
166         digitalWrite(A1_1, 1);
167         digitalWrite(A2_1, 0);
168         delay(250);
169
170         termopar2 = analogRead(amp1);
171         resultados[2] = moving_average2();
172     break;
173
174     case 3:
175         digitalWrite(A0_1, 1);
176         digitalWrite(A1_1, 1);
177         digitalWrite(A2_1, 0);
178         delay(250);
179
180         termopar3 = analogRead(amp1);
181         resultados[3] = moving_average3();
182
183     break;
184     case 4:
185
186         digitalWrite(A0_1, 0);
187         digitalWrite(A1_1, 0);
188         digitalWrite(A2_1, 1);
189         delay(250);
190
191         termopar4 = analogRead(amp1);
192         resultados[4] = moving_average4();
193
194     break;
195     case 5:
196
197         digitalWrite(A0_1, 1);
198         digitalWrite(A1_1, 0);
199         digitalWrite(A2_1, 1);
200         delay(250);
201
202         termopar5 = analogRead(amp1);
```

```
203     resultados[5] = moving_average5();
204
205     break;
206     case 6:
207
208         digitalWrite(A0_1, 0);
209         digitalWrite(A1_1, 1);
210         digitalWrite(A2_1, 1);
211         delay(250);
212
213         termopar6 = analogRead(amp1);
214         resultados[6] = moving_average6();
215
216
217     break;
218     case 7:
219         digitalWrite(A0_1, 1);
220         digitalWrite(A1_1, 1);
221         digitalWrite(A2_1, 1);
222         delay(250);
223
224         termopar7 = analogRead(amp1);
225         resultados[7] = moving_average7();
226
227     break;
228     case 8:
229         digitalWrite(A0_2, 0);
230         digitalWrite(A1_2, 0);
231         digitalWrite(A2_2, 0);
232         delay(250);
233
234         termopar8 = analogRead(amp2);
235         resultados[8] = moving_average8();
236
237     break;
238     case 9:
239
240         digitalWrite(A0_2, 1);
241         digitalWrite(A1_2, 0);
242         digitalWrite(A2_2, 0);
243         delay(250);
244
```

```
245     termopar9 = analogRead(amp2);
246     resultados[9] = moving_average9();
247
248     break;
249     case 10:
250
251         digitalWrite(A0_2, 0);
252         digitalWrite(A1_2, 1);
253         digitalWrite(A2_2, 0);
254         delay(250);
255
256         termopar10 = analogRead(amp2);
257         resultados[10] = moving_average10();
258
259         break;
260         case 11:
261
262             digitalWrite(A0_2, 1);
263             digitalWrite(A1_2, 1);
264             digitalWrite(A2_2, 0);
265             delay(250);
266
267             termopar11 = analogRead(amp2);
268             resultados[11] = moving_average11();
269
270             break;
271             case 12:
272
273                 digitalWrite(A0_2, 0);
274                 digitalWrite(A1_2, 0);
275                 digitalWrite(A2_2, 1);
276                 delay(250);
277
278                 termopar12 = analogRead(amp2);
279                 resultados[12] = moving_average12();
280
281                 break;
282                 case 13:
283
284                     digitalWrite(A0_2, 1);
285                     digitalWrite(A1_2, 0);
286                     digitalWrite(A2_2, 1);
```

```
287     delay(250);
288
289     termopar13 = analogRead(amp2);
290     resultados[13] = moving_average13();
291
292     break;
293     case 14:
294
295         digitalWrite(A0_2, 0);
296         digitalWrite(A1_2, 1);
297         digitalWrite(A2_2, 1);
298         delay(250);
299
300         termopar14 = analogRead(amp2);
301         resultados[14] = moving_average14();
302
303         break;
304         case 15:
305
306             digitalWrite(A0_2, 1);
307             digitalWrite(A1_2, 1);
308             digitalWrite(A2_2, 1);
309             delay(250);
310
311             termopar15 = analogRead(amp2);
312             resultados[15] = moving_average15();
313         break;
314
315     } // switch case
316 } // laco for
317
318     for(int j = 0; j<=15; j++){
319
320         Serial.print(resultados[j]);
321         Serial.print(",");
322
323     }; // for print
324     Serial.println();
325
326 } // void loop
327
328
```

```
329 // =====
330 // --- Desenvolvimento da FunVariaveics ao ---
331 long moving_average() //.8
332 {
333     //desloca os elementos do vetor de media movel
334     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers[i] = numbers[i-1];
335     numbers[0] = termopar; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
336     long acc = 0;          //acumulador para somar os pontos da
        media movel
337     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers[i]; //faz a somatoria do
        numeros de pontos
338     return acc/n; //retorna a media movel
339 } //end moving_average
340
341 long moving_average1() //.8
342 {
343     //desloca os elementos do vetor de media movel
344     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers1[i] = numbers1[i-1];
345     numbers1[0] = termopar1; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
346     long acc = 0;          //acumulador para somar os pontos da
        media movel
347     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers1[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
348     return acc/n; //retorna a media movel
349 } //end moving_average
350
351 long moving_average2() //.8
352 {
353     //desloca os elementos do vetor de media movel
354     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers2[i] = numbers2[i-1];
355     numbers2[0] = termopar2; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
356     long acc = 0;          //acumulador para somar os pontos da
        media movel
357     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers2[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
358     return acc/n; //retorna a media movel
359 } //end moving_average
360
361 long moving_average3() //.8
```

```
362 {
363     //desloca os elementos do vetor de media movel
364     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers3[i] = numbers3[i-1];
365     numbers3[0] = termopar3; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
366     long acc = 0;           //acumulador para somar os pontos da
        media movel
367     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers3[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
368     return acc/n; //retorna a media movel
369 } //end moving_average
370
371 long moving_average4() //.8
372 {
373     //desloca os elementos do vetor de media movel
374     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers4[i] = numbers4[i-1];
375     numbers4[0] = termopar4; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
376     long acc = 0;           //acumulador para somar os pontos da
        media movel
377     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers4[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
378     return acc/n; //retorna a media movel
379 } //end moving_average
380
381 long moving_average5() //.8
382 {
383     //desloca os elementos do vetor de media movel
384     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers5[i] = numbers5[i-1];
385     numbers5[0] = termopar5; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
386     long acc = 0;           //acumulador para somar os pontos da
        media movel
387     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers5[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
388     return acc/n; //retorna a media movel
389 } //end moving_average
390
391 long moving_average6() //.8
392 {
393     //desloca os elementos do vetor de media movel
394     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers6[i] = numbers6[i-1];
```

```
395     numbers6[0] = termopar6; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
396     long acc = 0;           //acumulador para somar os pontos da
        media movel
397     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers6[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
398     return acc/n; //retorna a media movel
399 } //end moving_average
400
401 long moving_average7() //.8
402 {
403     //desloca os elementos do vetor de media movel
404     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers7[i] = numbers7[i-1];
405     numbers7[0] = termopar7; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
406     long acc = 0;           //acumulador para somar os pontos da
        media movel
407     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers7[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
408     return acc/n; //retorna a media movel
409 } //end moving_average
410
411 long moving_average8() //.8
412 {
413     //desloca os elementos do vetor de media movel
414     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers8[i] = numbers8[i-1];
415     numbers8[0] = termopar8; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
416     long acc = 0;           //acumulador para somar os pontos da
        media movel
417     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers8[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
418     return acc/n; //retorna a media movel
419 } //end moving_average
420
421 long moving_average9() //.8
422 {
423     //desloca os elementos do vetor de media movel
424     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers9[i] = numbers9[i-1];
425     numbers9[0] = termopar9; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
426     long acc = 0;           //acumulador para somar os pontos da
```

```
        media movel
427   for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers9[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
428   return acc/n; //retorna a media movel
429 } //end moving_average
430
431 long moving_average10() //.8
432 {
433   //desloca os elementos do vetor de media movel
434   for(int i= n-1; i>0; i--) numbers10[i] = numbers10[i-1];
435   numbers10[0] = termopar10; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
436   long acc = 0; //acumulador para somar os pontos da
        media movel
437   for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers10[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
438   return acc/n; //retorna a media movel
439 } //end moving_average
440
441 long moving_average11() //.8
442 {
443   //desloca os elementos do vetor de media movel
444   for(int i= n-1; i>0; i--) numbers11[i] = numbers11[i-1];
445   numbers11[0] = termopar11; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
446   long acc = 0; //acumulador para somar os pontos da
        media movel
447   for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers11[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
448   return acc/n; //retorna a media movel
449 } //end moving_average
450
451 long moving_average12() //.8
452 {
453   //desloca os elementos do vetor de media movel
454   for(int i= n-1; i>0; i--) numbers12[i] = numbers12[i-1];
455   numbers12[0] = termopar12; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
456   long acc = 0; //acumulador para somar os pontos da
        media movel
457   for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers12[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
```

```
458     return acc/n; //retorna a media movel
459 } //end moving_average
460
461 long moving_average13() //.8
462 {
463     //desloca os elementos do vetor de media movel
464     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers13[i] = numbers13[i-1];
465     numbers13[0] = termopar13; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
466     long acc = 0; //acumulador para somar os pontos da
        media movel
467     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers13[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
468     return acc/n; //retorna a media movel
469 } //end moving_average
470
471 long moving_average14() //.8
472 {
473     //desloca os elementos do vetor de media movel
474     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers14[i] = numbers14[i-1];
475     numbers14[0] = termopar14; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
476     long acc = 0; //acumulador para somar os pontos da
        media movel
477     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers14[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
478     return acc/n; //retorna a media movel
479 } //end moving_average
480
481 long moving_average15() //.8
482 {
483     //desloca os elementos do vetor de media movel
484     for(int i= n-1; i>0; i--) numbers15[i] = numbers15[i-1];
485     numbers15[0] = termopar15; //posicao inicial do vetor recebe a
        leitura original
486     long acc = 0; //acumulador para somar os pontos da
        media movel
487     for(int i=0; i<n; i++) acc += numbers15[i]; //faz a somatoria
        do numeros de pontos
488     return acc/n; //retorna a media movel
489 } //end moving_average
```

APÊNDICE B – Código Processing - calibração dos termopares

```

1 import processing.serial.*;      //Biblioteca importante para essa
   aplicacao
2 Serial mySerial;                //Funcionalidade serial
3 PrintWriter output;            //Funcionalidade de escrita em
   arquivos
4
5 // Declaracao de variaveis
6 String entrada = "Para adicionar temperatura de referencia,
   digite-a e pressione enter.\n Se desenha encerrar o programa,
   pressione tab.";
7 String temperatura = "";
8 String temperatura_aux = "";
9 String valor = "";
10 String valor_aux = "";
11 String valor_aux2 = "";
12 // Fonte
13 PFont f;
14
15 void setup() {
16     size(570,700);              //
   cria uma janelinha
17     f = createFont("Times New Roman",16); //
   Seta a fonte
18     String portName = Serial.list()[0]; //
   configura a porta serial
19     mySerial = new Serial(this, portName, 9600); //
   Configura a porta serial
20     output = createWriter( "valores5555.txt" ); //
   Cria o objeto arquivo para gravar os dados
21 }
22
23
24 void draw() {                  //
   Mesma funcao loop do Arduino
25     background(0);            //

```

```
        fundo da tela preto
26  int ident = 50;                                //
        identacao do codigo
27  textFont(f);                                  //
        fonte
28  fill(255);                                    // cor
        do texto a seguir, branco
29  // print dos textos na tela definida em size
30  text(entrada, ident, 50);
31  text("Ultima temperatura adicionada: " + temperatura_aux, ident
        , 175);
32  text("Utimos valores recebidos do arduino: \n" + valor_aux2,
        ident, 300);
33  text(valor_aux, ident, 350);
34  text(valor, ident, 375);
35
36  if (mySerial.available() > 0 ) {              // Se
        receber um valor na porta serial
37  String value = mySerial.readStringUntil('\n'); // Le o
        valor recebido
38  if ( value != null ) {                        // Se o
        valor nao for nulo
39  output.println(value);                       // value
        e o valor recebido pela porta serial (valor que o
        LDR enviou)
40  output.flush();                             //
        termina de escrever os valores
41  valor_aux2 = valor_aux;                      // salva
        os valores anteriores para posterior print
42  valor_aux = valor;
43  valor = value;
44  }
45  }
46 }
47
48 void keyPressed() {                            // Se
        alguma tecla for pressionada
49  if (key == '\t')
50  {
51  output.flush();                              //
        Termina de escrever os dados pro arquivo
52  output.close();                             // Fecha
```

```
        o arquivo
53     exit(); // Para o
        programa
54 }
55 else
56 {
57     temperatura = temperatura + key; //
        atualiza o valor da temperatura
58     temperatura_aux = temperatura; // salva
        o valor da temperatura
59     if (key == '\n') //
60     {
61         output.println(temperatura); // salva
            o valor da temperatura que foi escrita
62         output.flush(); //
63         temperatura = ""; // zera a
            variavel
64     }
65 }
66 }
```

APÊNDICE C – Código Processing - coleta de dados

```
1 import processing.serial.*;      //Biblioteca importante para essa
    aplicacao
2 Serial mySerial;                //Funcionalidade serial
3 PrintWriter output;            //Funcionalidade de escrita em
    arquivos
4 String entrada = "Se desenha encerrar o programa, pressione tab."
    ;
5
6 // DECALRACAO DE VARIAVEIS
7 String valor = "";
8 String valor_aux = "";
9 String valor_aux2 = "";
10 String file_name = "";
11 String hora = "";
12 float[] temperatura = {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16};
13 int posicao;
14 int j = 1;
15 int k = 1;
16
17 // coeficientes a da reta
18 float[] a = { 0.232668928674773,
19              0.233627003422792,
20              0.234694095246997,
21              0.232872159430383,
22              0.233012117244894,
23              0.233024759085618,
24              0.232619477830782,
25              0.22874192290647,
26              0.230722194502862,
27              0.228286437477186,
28              0.229484016252351,
29              0.227346021799176,
30              0.230914983921355,
31              0.231008845308816,
32              0.231984471138021,
```

```
33         0.233115034135416});
34
35 // coeficientes b da reta
36 float[] b ={5.709331888,
37             5.019511097,
38             3.767595739,
39             4.264129527,
40             3.685267577,
41             3.477510794,
42             3.738524661,
43             3.82270548,
44             7.366905993,
45             6.936392713,
46             6.57088301,
47             6.856165613,
48             5.187165666,
49             4.878605497,
50             4.40262997,
51             4.209379099});
52
53 // fonte
54 PFont f;
55
56 void setup() {
57     size(600,500); // cria uma
58     janelinha
59     f = createFont("Times New Roman",16); // Seta a
60     fonte
61     String portName = Serial.list()[0]; // configura
62     a porta serial
63     mySerial = new Serial(this, portName, 9600); // Configura
64     a porta serial
65     file_name = year() + "." + month() + "." + day() + "-" +
66     hour() + "." + minute() + "." + second() + "-" + "
67     temperaturas.txt"; // nome do arquivo
68     output = createWriter(file_name); // Cria o
69     objeto arquivo para gravar os dados
70 }
71
72 void draw() { // Mesma
73     coisa que a funcao loop do Arduino
```

```
67 background(0); // fundo da
    tela preto
68 int ident = 50; // identacao
    do codigo
69
70 // print dos textos na tela definida em size
71 textFont(f);
72 fill(255);
73 text(entrada, ident, 50);
74 text("Utimos valores recebidos do arduino: \n" + valor_aux2,
    ident, 100);
75 text(valor_aux, ident, 150);
76 text(valor, ident, 175);
77 text("Em temperatura: \n", ident, 200);
78
79
80 String[] temperatura_aux = split(valor, ','); // string
    usada para trabalhar os valores recebidos pelo arduino
81
82 for(int i = 0; i <= temperatura_aux.length-2; i++)
83 {
84     temperatura[i] = a[i] * float(temperatura_aux[i]) + b[i];
    // calculo das temperaturas com base nos valores de a e b
85
86     // print dos valores na tela. Esse if foi usado para
    plotagem em duas linhas
87     if(i >= 8) {
88         posicao = 250;
89         fill(255);
90         text(temperatura[i], j*60, posicao);
91         j++;
92         k = 1;
93     }
94     else {
95         posicao = 225;
96         fill(255);
97         text(temperatura[i], k*60, posicao);
98         k++;
99         j = 1;
100     }
101 }
102
```

```
103  if (mySerial.available() > 0 ) { //Se
    receber um valor na porta serial
104  String value = mySerial.readStringUntil('\n'); //Le o
    valor recebido
105  if ( value != null ) // Se o
    valor nao for nulo
106  {
107  valor_aux2 = valor_aux; // salva
    os valores para printa-los depois
108  valor_aux = valor;
109  valor = value;
110
111  // Escreve os valores calculados no .txt
112  for(int i = 0; i <= temperatura_aux.length-2; i++)
113  {
114  output.print(temperatura[i]);
115  output.print(",");
116  output.flush();
117  }
118  output.println();
119  output.flush();
120  }
121  }
122  // print da hora
123  hora = hour() + ":" + minute() + ":" + second();
124  text(hora, 500, 30);
125  }
126
127  void keyPressed() { //Se alguma
    tecla for pressionada
128  if (key == '\t') // se a tecla
    for tab
129  {
130  output.flush(); // Termina de
    escrever os dados pro arquivo
131  output.close(); // Fecha o
    arquivo
132  exit(); // Para o
    programa
133  }
134  }
```

APÊNDICE D – Tabelas

Tabela 5 – Leituras - termopares

T (°C)	Termopar (mV)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
28	106	110	110	110	111	114	115	110	105	102	106	109	114	115	116	117
	106	109	109	110	111	115	116	110	105	102	106	109	114	115	116	117
	106	110	110	111	111	115	116	109	104	102	106	109	114	115	116	117
	106	110	110	111	112	115	116	110	105	102	106	109	114	115	116	117
	106	109	111	111	111	115	116	109	105	102	106	109	115	115	116	117
	106	109	110	111	111	115	116	110	105	102	106	109	115	115	116	117
	106	109	110	110	111	114	116	109	105	102	106	109	115	115	116	117
	106	109	110	111	111	115	116	109	105	102	106	109	114	115	116	117
	106	109	111	111	111	115	116	110	105	102	106	109	114	115	116	117
	106	109	110	111	111	115	116	110	105	102	106	109	114	115	116	117
	106	109	110	111	111	115	116	110	105	102	106	110	115	115	116	117
	106	109	111	111	111	115	116	110	105	102	106	110	115	115	116	117
48	193	196	199	199	202	202	201	206	185	190	189	192	194	194	196	195
	193	196	199	199	202	202	201	206	185	190	188	192	193	194	196	195
	193	196	199	199	202	202	200	206	186	190	189	192	193	194	195	195
	192	195	199	200	202	202	201	206	186	190	189	192	193	193	195	195
	192	195	198	199	201	201	200	205	186	190	189	192	193	193	195	195
	191	193	197	198	200	201	200	205	186	191	189	192	193	193	195	195
	191	193	198	198	200	201	200	205	186	190	189	192	193	193	195	194
	191	192	197	197	199	200	199	205	186	190	189	192	193	193	195	194
	191	191	196	197	199	199	198	204	186	190	189	192	193	193	195	194
	191	192	196	196	199	199	198	205	186	190	190	192	193	193	195	194
	190	191	196	197	199	200	198	205	186	190	190	193	193	193	195	195
	190	191	195	196	199	199	198	204	186	190	190	193	194	194	196	195
57.5	217	219	224	224	227	227	227	231	208	215	215	217	220	222	223	222
	217	219	223	222	225	225	225	230	212	217	217	217	221	222	223	223
	218	219	224	222	225	225	225	230	212	217	217	217	220	222	223	223

Continua na próxima página

Tabela 5 – Continuação da página anterior

T (°C)	Termopar (mV)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	218	219	225	223	225	226	225	230	212	217	216	217	220	222	223	223
	218	220	226	223	226	226	226	231	213	217	217	217	221	222	223	223
	218	219	225	223	226	226	226	231	212	217	217	216	221	222	223	223
	219	220	226	223	226	228	226	231	212	216	216	215	220	222	223	223
	219	220	227	224	226	228	227	231	212	217	216	214	220	222	222	223
	220	220	227	224	227	228	227	232	212	217	216	215	221	222	223	223
	219	219	227	224	228	229	228	232	212	217	216	215	221	222	223	223
	219	219	228	225	228	229	227	232	213	216	216	214	221	222	223	223
	220	221	228	225	228	229	227	232	212	216	216	212	221	222	223	223
	220	221	228	226	229	230	228	233	213	216	216	210	221	221	223	223
	222	222	227	226	229	230	229	234	212	217	216	210	220	222	223	223
	222	221	226	226	229	231	228	234	212	216	216	209	220	221	223	223
	222	222	227	226	230	231	228	233	212	216	215	210	219	221	222	222
	223	223	227	227	230	229	228	233	212	216	215	210	219	221	222	223
	223	223	227	227	231	230	229	234	211	214	214	207	218	220	222	222
	224	225	227	228	232	232	230	235	210	213	213	207	217	220	221	222
	224	226	227	227	231	231	230	235	210	213	213	207	217	220	221	222
	224	225	227	228	232	231	231	236	209	212	213	206	217	219	221	222
	225	226	229	229	234	232	231	236	208	211	212	206	216	219	220	221
	225	226	228	228	235	232	231	236	207	211	212	206	215	218	219	221
	224	227	229	229	236	232	231	236	207	210	212	206	214	217	220	221
	223	228	229	230	237	232	231	237	206	209	211	204	214	217	219	220
	224	228	231	231	237	233	231	237	206	209	210	203	213	216	219	220
	224	227	231	231	238	234	233	238	205	208	210	204	211	216	220	219
	224	228	232	232	238	234	231	237	206	209	210	204	212	217	221	219
	223	228	232	231	236	233	229	236	206	209	210	201	212	216	220	219
	223	227	231	231	236	233	229	235	206	210	210	202	211	216	220	218
	222	227	230	230	235	233	229	236	206	210	209	202	211	215	219	217
59.5	233	233	239	236	240	241	239	242	220	223	223	218	227	230	231	231
	232	234	238	238	240	240	239	243	221	225	224	220	229	231	232	232
	230	233	237	237	240	240	239	243	221	225	225	221	229	231	232	232
	231	233	237	237	240	240	239	243	222	227	226	223	230	233	233	233
	229	232	236	237	240	239	238	243	223	227	226	224	230	233	233	233
	229	232	236	237	240	239	238	243	223	228	227	226	230	233	234	233
	229	231	236	237	238	238	237	242	223	228	226	226	230	233	234	233
	229	231	236	236	238	238	237	242	223	228	226	228	231	233	234	234
	228	231	236	236	238	238	236	242	223	228	226	228	231	233	234	233
	228	231	235	235	238	239	236	242	224	228	228	230	232	233	234	234

Continua na próxima página

Tabela 5 – *Continuação da página anterior*

T (°C)	Termopar (mV)																
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
62.5	241	242	247	246	249	250	249	253	237	242	241	244	246	248	249	249	
	241	243	248	247	250	250	249	254	238	242	242	244	247	248	249	250	
	241	243	247	246	249	250	249	254	238	242	242	244	247	248	249	250	
	241	243	248	247	250	250	249	254	238	243	242	244	247	248	249	249	
	240	242	247	246	249	250	249	254	238	242	242	244	247	248	248	248	
	240	242	247	247	250	250	249	254	238	243	242	244	246	248	248	248	
	239	242	247	246	249	249	249	254	238	242	242	244	246	248	248	248	
	240	242	247	246	249	249	248	253	237	242	242	244	246	247	248	248	
	240	242	247	246	249	250	249	254	238	242	242	244	246	247	248	248	
	239	241	246	246	249	249	249	254	238	242	243	245	246	247	248	247	
	239	241	246	246	249	249	249	254	238	243	243	245	246	247	248	247	
	238	241	245	245	248	249	249	254	238	243	243	245	246	247	248	247	
	238	241	245	246	248	249	249	254	238	243	243	245	246	247	248	247	
	238	240	245	245	248	249	248	253	238	243	243	245	246	247	248	247	
	238	240	245	245	247	249	248	253	238	242	242	244	246	247	248	248	
	238	240	245	245	247	248	248	252	237	242	242	244	246	247	248	248	
	238	240	245	245	247	248	247	252	236	242	241	244	246	247	247	247	
	238	240	245	245	247	248	247	252	237	242	241	244	246	246	247	247	
	64.5	246	247	253	253	254	255	255	260	244	249	248	250	253	253	254	254
		246	248	254	253	254	255	255	260	244	249	248	250	253	254	254	254
246		248	254	253	254	256	255	260	244	249	249	250	253	254	255	254	
246		248	254	253	255	256	255	260	244	249	249	251	253	254	255	254	
247		249	254	253	255	256	255	260	245	249	249	251	254	255	255	255	
247		249	253	253	256	257	256	260	245	249	249	251	254	255	255	255	
247		249	253	253	256	257	256	261	245	250	249	251	254	255	255	255	
247		249	253	253	256	257	255	260	245	250	249	251	254	255	255	255	
246		248	253	253	256	257	255	260	245	250	249	252	254	255	255	256	
246		249	253	253	256	256	255	260	244	250	249	252	254	255	255	256	
246		248	253	253	256	257	255	260	244	250	249	252	254	255	255	256	
247		249	253	253	256	257	255	260	245	250	250	252	254	255	255	256	
247		249	253	253	256	257	255	261	245	250	250	252	254	255	255	256	
246		249	253	253	256	257	255	260	245	250	250	252	254	255	255	256	
246		249	253	253	256	257	255	260	245	250	249	252	254	255	255	256	
247		249	254	253	256	257	255	260	245	250	249	252	254	255	256	256	
66.5		257	259	265	264	266	267	267	271	256	260	260	262	264	265	266	266
		257	259	265	264	266	267	267	271	257	260	260	262	264	266	266	266
		257	259	265	264	266	268	267	271	257	261	260	263	265	265	266	266
		257	259	265	264	266	267	267	271	257	261	260	263	264	266	266	266

Continua na próxima página

Tabela 5 – Continuação da página anterior

T (°C)	Termopar (mV)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	257	259	264	264	266	267	267	271	257	261	260	263	264	266	266	266
	257	259	264	264	266	267	267	271	257	261	260	263	265	266	267	267
	258	260	265	264	266	267	267	272	257	261	260	262	264	266	266	266
	258	260	265	265	266	268	267	272	257	261	260	262	264	266	266	266
	257	259	265	264	266	268	267	272	257	261	261	263	265	266	267	266
	257	259	264	264	266	267	267	271	257	261	261	263	265	266	268	267
	257	259	264	264	266	267	266	271	257	261	261	263	265	266	267	267
	258	260	265	264	266	267	267	271	256	261	260	262	264	265	267	266
	258	260	265	264	266	267	267	271	256	260	260	263	264	266	267	266
	257	260	265	264	266	267	267	271	256	260	260	262	265	266	267	266
	258	260	265	264	266	267	267	270	256	261	261	262	265	266	267	266
68	269	271	276	275	278	279	278	282	268	272	272	274	276	277	278	277
	269	271	276	275	278	279	278	282	268	272	272	274	276	277	278	277
	269	271	276	275	278	279	278	282	268	272	272	274	276	277	278	277
	269	271	276	275	278	279	278	282	268	272	272	274	276	277	277	277
	269	271	276	275	278	279	278	282	268	272	272	274	276	277	277	277
	269	271	276	275	278	279	278	282	268	272	272	274	276	277	278	277
	269	271	276	275	277	279	277	282	267	272	272	274	276	277	277	276
	269	271	276	275	277	279	277	282	267	271	272	273	276	277	278	277
	269	271	276	275	278	279	278	282	267	272	272	273	276	277	277	277
	269	271	276	275	278	279	277	282	267	272	271	273	276	277	278	277
	269	271	276	276	278	279	277	282	267	271	271	273	276	276	277	277
	269	271	276	276	278	279	277	282	267	271	271	273	276	277	278	277
	269	271	275	275	277	279	277	282	266	271	271	273	276	276	278	276
	269	271	275	275	277	278	277	282	267	271	271	273	276	277	278	277
	269	271	275	275	277	278	277	282	266	271	271	273	275	276	278	276
	269	271	275	275	277	278	277	282	267	271	272	273	276	277	278	277
	269	271	275	275	277	279	277	282	267	271	271	273	275	277	278	277
	269	271	275	274	277	278	277	281	267	271	271	273	275	276	278	276
72	280	282	287	286	288	289	289	293	279	284	283	286	288	289	289	289
	280	282	287	286	288	289	289	294	279	284	282	286	288	289	289	289
	280	282	287	287	288	289	289	294	279	284	283	285	288	289	289	289
	280	282	287	287	288	289	289	294	279	284	283	286	288	289	289	289
	280	283	287	288	289	289	289	294	279	284	283	286	288	289	289	289
	280	283	287	287	289	289	289	293	278	284	283	286	288	289	289	289
	280	283	287	287	289	288	289	294	279	284	283	286	288	290	290	290
	280	283	287	287	289	288	289	293	279	284	283	286	288	289	290	290

Continua na próxima página

Tabela 5 – *Continuação da página anterior*

T (°C)	Termopar (mV)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
75	280	283	287	287	289	288	289	294	279	284	283	286	288	289	290	290
	289	289	295	296	298	298	297	304	289	292	293	296	297	299	301	299
	289	289	296	296	298	299	298	303	289	293	293	296	298	300	301	299
	289	290	296	296	298	298	298	304	289	293	293	296	298	300	301	299
	289	290	296	297	298	298	298	304	290	294	294	296	298	300	302	300
	289	291	296	297	298	299	299	304	290	294	294	296	298	300	301	300
	289	292	297	297	297	299	299	304	291	294	294	297	298	301	301	300
	289	292	297	297	297	299	299	304	290	294	294	297	298	301	301	300
	289	292	297	296	297	299	299	304	291	295	294	296	298	301	301	299
	289	292	297	296	297	299	299	304	291	295	294	297	298	301	300	299
77	289	292	297	296	297	299	300	304	291	295	294	297	298	301	300	299
	290	293	297	297	298	299	300	305	291	295	295	297	299	301	300	299
	290	293	297	297	298	299	299	305	291	295	295	298	299	301	300	299
	302	302	307	307	309	310	309	314	299	303	303	305	307	308	308	308
	302	302	307	307	308	311	310	314	299	303	303	305	307	308	309	308
	301	302	307	307	309	311	310	315	300	303	303	306	307	308	309	308
	301	303	307	307	309	310	310	315	300	304	304	306	307	308	310	308
	302	303	307	308	309	310	310	314	299	304	304	306	307	309	310	308
	302	303	308	308	309	311	310	314	299	304	304	305	307	308	310	308
	302	304	309	308	310	311	311	315	300	305	304	306	308	309	310	308
81.5	302	304	309	308	310	311	311	315	300	305	304	306	308	310	311	309
	303	304	309	309	311	312	311	316	300	305	305	307	309	310	311	309
	302	303	309	308	311	312	312	316	300	305	305	307	309	310	312	310
	303	304	309	308	311	312	312	316	299	305	305	307	309	310	312	310
	303	304	310	309	312	312	312	317	298	306	305	307	310	311	312	310
	318	318	324	324	326	328	326	332	313	321	321	324	325	326	327	326
	317	318	324	323	326	328	326	332	314	320	321	324	325	326	327	326
	318	318	324	324	327	327	327	332	316	321	322	324	325	326	327	325
	318	318	325	324	327	328	327	332	317	321	322	324	326	327	328	326
	318	319	324	324	327	328	328	333	316	322	322	324	326	327	328	326
85.5	319	319	325	325	327	329	328	333	317	322	322	324	326	327	328	326
	319	320	325	325	328	329	329	333	317	321	322	325	327	328	329	327
	320	321	326	326	328	330	329	334	317	321	323	325	327	328	329	327
	320	321	326	326	329	330	329	334	317	321	323	325	327	328	329	328
	320	321	326	326	329	330	330	334	317	322	323	325	328	329	330	328
	321	322	327	327	330	330	330	335	318	322	324	325	328	329	331	329
	321	323	328	328	330	331	331	335	318	323	324	325	328	330	330	329
	341	342	347	346	348	350	350	354	339	343	343	345	347	348	349	348

Continua na próxima página

Tabela 5 – Continuação da página anterior

T (°C)	Termopar (mV)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	341	343	347	347	348	350	350	355	340	343	344	345	347	348	349	348
	342	344	348	348	349	351	351	356	340	344	344	346	348	349	350	349
	342	344	349	348	349	351	352	356	341	344	345	346	348	349	350	349
	342	344	349	349	350	352	352	357	341	344	345	347	349	350	351	350
	342	345	350	349	350	352	353	357	341	345	345	347	349	350	351	350
	343	345	350	350	350	353	353	358	342	345	345	347	349	351	351	350
	343	345	350	350	350	353	353	357	342	345	346	348	349	351	352	351
	343	346	351	351	351	353	353	358	342	346	345	348	349	350	352	350
	343	346	350	350	351	353	353	358	342	346	345	348	349	351	352	350
	343	346	350	350	351	353	353	358	342	346	345	348	349	351	352	350
	343	346	350	350	351	352	353	358	341	346	345	348	349	351	352	351
	343	345	350	349	351	352	353	357	341	345	345	347	349	350	352	350
90	367	369	372	371	374	375	374	380	359	363	364	367	368	370	369	370
	367	369	373	371	373	374	374	379	360	364	364	367	368	369	369	370
	366	369	372	370	372	374	374	379	360	364	364	367	368	370	368	369
	367	369	372	371	373	374	374	379	360	364	364	367	368	369	368	369
	366	368	372	370	372	374	374	379	361	364	364	367	368	370	369	369
	366	368	372	370	372	373	373	378	361	364	364	367	368	370	369	370
	366	368	372	370	372	373	372	378	361	364	364	367	368	369	369	370
	366	368	371	370	371	373	372	378	360	365	364	366	369	370	369	370
	364	365	370	369	371	372	372	378	361	365	365	366	369	370	370	370
	364	365	369	369	370	371	371	377	361	365	365	367	369	370	370	370
	364	364	369	369	370	371	371	377	360	364	365	366	369	369	370	370
93.5	381	383	386	386	389	390	390	395	378	382	382	384	386	387	388	386
	381	383	386	386	388	390	390	395	378	383	382	385	387	388	388	386
	381	383	386	386	388	390	389	395	378	383	382	385	387	388	389	387
	381	383	386	386	388	390	389	395	378	383	383	385	387	388	389	386
	381	383	386	386	388	390	389	395	378	383	382	384	386	388	388	386
	382	383	387	386	388	389	389	395	379	383	382	385	386	388	388	386
	382	384	387	387	389	390	390	395	379	383	383	385	386	388	388	386
	382	384	386	387	389	390	390	395	379	383	383	385	387	388	389	387
	382	384	386	387	389	390	390	395	379	383	382	384	387	388	388	387
	382	384	386	387	389	391	391	395	379	383	383	384	387	388	388	387
	382	383	386	387	389	391	391	395	379	383	382	384	387	388	389	387
	382	384	386	387	389	391	391	395	379	383	383	384	387	388	388	387
	382	384	387	388	390	391	390	395	379	382	383	384	387	388	388	387
	382	384	387	388	390	391	391	395	379	383	383	385	387	388	388	387

Continua na próxima página

Tabela 5 – *Continuação da página anterior*

T (°C)	Termopar (mV)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
96	394	396	398	400	403	403	403	408	392	396	396	399	400	402	402	401
	394	396	398	400	403	404	403	408	393	397	396	399	401	402	402	401
	394	396	398	400	402	403	403	408	392	397	396	399	400	402	402	401
	395	396	397	401	402	404	403	408	393	397	397	399	401	402	402	401
	394	396	396	400	402	403	403	408	392	397	396	399	401	402	403	401
	395	395	396	401	402	404	403	408	393	397	397	399	401	402	403	401
	394	395	396	400	402	404	403	408	393	397	397	399	401	402	403	401
	395	395	397	400	402	404	403	408	393	397	396	399	400	401	403	402
	395	396	397	400	402	404	403	408	393	397	396	399	400	401	403	402
	395	396	397	400	402	404	403	408	393	397	396	398	400	401	402	402
	395	395	397	400	403	404	403	408	393	397	396	398	400	401	402	402
	394	396	397	400	403	404	403	408	393	397	396	399	400	402	402	402
	394	396	397	400	403	404	403	408	393	397	396	399	400	402	402	402
394	395	397	400	403	404	403	408	393	397	396	399	400	402	402	402	
99	405	406	410	412	414	415	415	421	400	407	407	409	411	411	413	412
	405	407	410	412	414	415	415	421	402	408	407	409	411	412	413	413
	405	407	409	412	414	415	415	421	402	408	407	409	411	412	413	413
	406	407	409	412	415	415	415	421	403	408	408	409	411	412	413	413
	406	407	408	412	415	415	415	421	403	408	408	409	411	412	413	413
	406	407	408	412	415	415	416	421	403	408	408	409	411	412	413	413
	406	407	408	412	415	416	416	420	403	408	408	409	412	413	413	414
	407	407	407	412	415	415	416	420	403	408	408	408	411	412	413	413
	407	408	410	412	415	416	416	420	404	408	408	408	411	413	413	413
	408	408	410	412	415	416	416	420	404	408	408	408	412	413	413	413
	408	409	410	412	416	416	417	421	404	408	408	409	412	414	413	414
	408	409	409	412	415	415	416	420	404	408	408	409	412	413	414	413
	408	409	409	412	416	415	416	420	404	408	408	409	411	413	414	413