

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL
RAMO ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR FLEXÍVEL E DE
BAIXO CUSTO

CLEBER PIZZATTO DALLEGRAVE

Bragança

2020



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão



INSTITUTO FEDERAL Campus
Rio Grande do Sul Erechim

**MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL
RAMO ENGENHARIA MECÂNICA**

CLEBER PIZZATTO DALLEGRAVE

**DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR FLEXÍVEL E DE
BAIXO CUSTO**

Relatório Final da Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Industrial
Especialização em Engenharia Mecânica

Orientador:
Professor Doutor Luís Manuel Frólén Ribeiro
Co-Orientador:
Professor Doutor Airton Campanhola Bortoluzzi

Bragança
Julho 2020

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado sabedoria e força para cumprir essa bênção que recebi Dele de cursar o mestrado e por ter achado que eu era merecedor. Ao mesmo tempo em que peço Seu perdão por ter despendido tanto tempo, esforço e energia que poderiam ter sido usados para fazer a Sua obra e as coisas que me aproximassem mais Dele.

Ao meu pai, Wilson Dallegrave (*in memoriam*), por ter sido a minha base, por todo amor e cuidados que me deu durante sua vida. À minha mãe, Rosane, pelas incontáveis batalhas que enfrentou por nós, pois sem ela nada disso seria possível e por todo amor e atenção. Ao meu padrasto, Wilson Kuliesis, por todo incentivo, apoio e cuidados.

Ao meu irmão, Delber, por ser meu exemplo e pela confiança que sempre depositou no meu potencial. Também, pela fundamental ajuda na solução dos diversos problemas que surgiram no decorrer do trabalho referentes à programação, configuração e instalação dos softwares.

À minha namorada, Alessandra, pelo amor, companhia e por ter colocado os meus sonhos à frente dos seus, abdicando do conforto do seu lar para estar ao meu lado durante toda essa caminhada.

À toda minha família por todas as mensagens, ligações que, mesmo à distância, sempre estiveram ao meu lado e por sempre terem acreditado em mim, desde minha partida do Brasil. Em especial, aos meus avós, Raul e Genilda, por toda atenção e carinho.

Aos meu amigos e colegas de projeto: Lincoln Tadashi Warikoda pelas importantes contribuições no desenvolvimento do projeto de todo o sistema, na elaboração do artigo submetido ao CIES e pelo companheirismo neste período; Matheus de Oliveira pelo auxílio desde os primeiros passos deste trabalho até os ajustes finais e apoio nas simulações e Gleison Müller pelo suporte no projeto e na fabricação da

bancada. E, aos demais amigos e colegas pela fundamental ajuda e pela parceria durante esse período do curso.

Ao meu orientador, professor Luis Manuel Frólén Ribeiro, pela sugestão do tema, por ter acreditado no meu trabalho, pelos ensinamentos, atenção e todo suporte prestado. Ao meu co-orientador, professor Airton Campanhola Bortoluzzi, por ter aceitado o convite na participação desse trabalho e pelas contribuições. Aos professores José Rufino e José Luís Gonçalves pelo suporte e por solucionar todos os problemas resultantes da máquina virtual. Ao engenheiro Arsénio Araújo da ESAB, pela disponibilização dos dados meteorológicos da cidade de Bragança. E a todos os professores, engenheiros e funcionários do IPB que contribuíram com o trabalho.

Ao IPB e ao IFRS pela oportunidade que me concederam para realizar esse trabalho, através do programa de Dupla Diplomação, fornecendo todos os recursos e a estrutura necessários para a sua concretização.

E a todos que de alguma maneira contribuíram para este trabalho.

*Aquele que trabalha duro pode superar
um gênio, mas de nada adianta trabalho duro
se você não confia em si mesmo.*

(Rock Lee)

RESUMO

DALLEGRAVE, Cleber Pizzatto. **Desenvolvimento de um Coletor Solar Flexível e de Baixo Custo**. 89 f. Dissertação – Programa de Dupla Diplomação, Instituto Politécnico de Bragança, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – *Campus Erechim*. Bragança, 2020.

Esse trabalho reporta o projeto de um coletor solar flexível e de baixo custo, em filme de poliuretano (PU), e a sua análise térmica. Por ser modular, flexível e com materiais de baixo custo para facilitar o transporte, ampliar a variedade de superfícies em que pode ser instalado e reduzir os gastos de aquisição, o coletor pode ser utilizado em eventos de curta duração como festivais e acampamentos ou até mesmo em comunidades carentes. O modelo do coletor é composto por três partes: cobertura transparente, camada absorvedora e camada para isolamento. A camada absorvedora possui cinco canais para circulação de água que comportam o volume de água de 18 litros. A circulação da água no sistema ocorre pelo efeito termossifão. O modelo do coletor solar foi feito no software SolidWorks 2019, os projetos da bancada foram feitos no software Autodesk Inventor 2020 e as simulações no software ANSYS/Fluent™ 19.3. Também, projetou-se e construiu-se uma bancada para a realização de testes reais de operação do coletor, inserido num sistema de aquecimento solar de água, composto, ainda, por reservatório térmico, tubagens e conexões hidráulicas. O total de 20 desenhos cotados compõem os projetos do coletor solar e da bancada. O sistema foi simulado para as condições de inverno da cidade de Bragança, Portugal, por ser a estação do ano mais extrema. Durante a primeira hora de operação, o coletor elevou a temperatura da água na saída em 6 K e gerou a potência calorífica de 32,35 W. Os estudos apresentados mostram a potencialidade do coletor, atingindo a eficiência de 59,73 %.

Palavras-Chave: Sistema de Aquecimento de Água, Termossifão, Energia Solar.

ABSTRACT

DALLEGRAVE, Cleber Pizzatto. **Development of a Flexible and Low-Cost Solar Collector**. 89 f. Dissertation – Double Diploma Program, Bragança Polytechnic Institute, Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Sul – Campus Erechim. Bragança, 2020.

This work reports the design of a flexible and low-cost solar collector in polyurethane (PU) film, and its thermal analysis. For being modular, flexible and with low-cost materials to facilitate transportation, expand the variety of surfaces on which it can be installed and reduce acquisition costs, the collector can be used for short-term events such as festivals and camps or even in needy communities. The collector model consists of three parts: transparent layer, absorber layer and layer for insulation. The absorber layer has five channels for water circulation that hold the water volume of 18 liters. The circulation of water in the system occurs by the thermosiphon effect. The solar collector model was made in the SolidWorks 2019 software, the bench designs were made using Autodesk Inventor 2020 software and simulations in ANSYS/Fluent™ 19.3 software. Also, a bench was designed and built to carry out real tests of the collector's operation, inserted in a solar water heating system, composed, still, by thermal reservoir, pipes and hydraulic connections. A total of 20 dimensioned drawings make up the solar collector and bench designs. The system was simulated for the winter conditions in the city of Bragança, Portugal, for being season more critical. During the first hour of operation, the collector raised the water temperature at the outlet by 6 K and generated the heat power of de 37,9. The studies presented show the potential of the collector, reaching an efficiency of 68.76%.

Keywords: Water Heating System, Thermosiphon, Solar Energy.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento Histórico	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização do texto	3
1.4. Nota final	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Estado da arte	5
2.1.1. Trabalhos precedentes	5
2.2. Permutadores de calor	16
2.3. Sistema de aquecimento solar de água.....	18
2.3.1. Coletores do tipo placa plana	18
2.3.2. Tipos de conexão de coletores solares	20
2.3.3. Congelamento e ebulição nos sistemas de aquecimento de água.....	21
2.3.4. Circuito aberto e circuito fechado	22
2.3.5. Ativo e passivo.....	23
2.3.6. Reservatório Térmico	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1. Sistema completo	27
3.2. Coletor solar flexível	28
3.3. Bancada para o sistema.....	30
3.3.1. Estrutura para o coletor solar.....	30
3.3.2. Estrutura para o reservatório térmico	31
3.3.3. Reservatório térmico.....	32
3.3.4. Forças atuantes na bancada	33
3.3.5. Análise numérica da bancada.....	34
3.4. Instrumentação	35
3.5. Avaliações energéticas e rendimento do coletor	36
3.5.1. Potência calorífica	36
3.5.2. Perda térmica	37
3.5.3. Desempenho	38

3.6. Modelo numérico	39
3.6.1. Inclinação do coletor	40
3.6.2. Malha	40
3.6.3. Configuração do Ansys Fluent.....	44
3.6.4. Configuração da solução	47
3.7. Adaptação do protótipo não funcional	48
3.8. Construção do sistema	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1. Coletor solar flexível	50
4.2. Bancada	57
4.2.1. Estrutura para o coletor	57
4.2.2. Estrutura para o reservatório térmico	59
4.3. Fabricação da bancada	78
4.4. Teste numérico	78
4.5. Avaliações energéticas e rendimento do coletor	81
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	82
5.1. Conclusões	82
5.2. Propostas para trabalhos futuros	83

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Protótipo não funcional [5].....	8
Figura 2.2 – Evolução dos coletores desenvolvidos.....	10
Figura 2.3 – Principais componentes de um coletor solar do tipo placa plana [9] (adaptado).....	19
Figura 2.4 – Conexões de coletores solares em série e em paralelo [10] (adaptado).	20
Figura 2.5 – Sistema de aquecimento solar de água de circuito aberto [10] (adaptado).	22
Figura 2.6 – Sistema de aquecimento solar de água de circuito fechado [10] (adaptado).....	23
Figura 2.7 – Estratificação de um reservatório em três nós [8] (adaptado).....	25
Figura 2.8 – Circulação natural de água num aquecimento solar por termossifão [6].	26
Figura 3.1 – Montagem do coletor solar e do reservatório térmico.	28
Figura 3.2 – Modelo do protótipo não funcional do coletor solar.....	29
Figura 3.3 – Apoio em forma de A.....	31
Figura 3.4 – Representação do modelo do reservatório térmico.....	32
Figura 3.5 – Componentes do reservatório térmico: (a) canhão depósito, (b) união multicamada e (c) anel de vedação o’ring.....	33
Figura 3.6 – Controlo da malha.....	42
Figura 3.7 – Distribuição dos nós no modelo.	43
Figura 3.8 – Fluxo de calor na cidade de Bragança durante o inverno de 2019/2020.	46
Figura 3.9 – Fluxo de calor de um dia de inverno em Bragança.	46

Figura 3.10 – Etapas do processo de fabricação do sistema; (a) corte das cantoneiras, (b) alinhamento e (c) soldadura.....	49
Figura 4.1 – Deslocamento total da estrutura para o coletor.....	58
Figura 4.2 – Tensão equivalente (von-Mises) na estrutura para o coletor.....	59
Figura 4.3 – Tensão equivalente na estrutura para o reservatório.	61
Figura 4.4 – Deslocamento total da estrutura para o reservatório.....	61
Figura 4.5 – Componentes da bancada: (a) quadro da estrutura para o coletor, (b) Apoios em A, (c) estrutura para o reservatório.	78
Figura 4.6 – Comportamento da temperatura na saída do coletor.	79
Figura 4.7 – Comportamento do caudal mássico na saída do coletor.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos	Descrição	Unidade
A	Área	m^2
c_p	Calor específico	$J/kg\cdot K$
c_a	Coeficiente de arrasto	-
F_a	Força de arrasto	N
g	Gravidade	m/s^2
G	Radiação solar	W/m^2
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$W/m^2\cdot K$
I	Irradiação solar	W/m^2
k	Coeficiente de condutividade térmica do material	$W/m\cdot K$
m	Massa	kg
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s
Q	Quantidade de transferência de calor	J
\dot{Q}	Potência Térmica	W
T	Temperatura	K
U	Coeficiente global de transferência de calor	$W/m^2\cdot K$
V	Velocidade de escoamento do fluido	m/s
W	Força peso	N

Símbolo grego	Descrição	Unidade
α	Absortividade	-
β	Inclinação do coletor	$^\circ$
η	Eficiência do coletor	-
ρ	Densidade da água	kg/m^3
ΔT	Varição da temperatura do sistema	K
v	Volume de água	m^3

Subscrito	Descrição
∞	Fluido
abs	Absorvida
a	Ambiente
c	Coletor
ent	Entrada
f	Frio
L	Carregamento
m	Média
p	Perdida
q	Quente
s	Superfície
sai	Saída

LISTA DE ACRÓNIMOS

Sigla	Descrição
ANSI	American National Standards Institute
CAD	Desenho Assistido por Computador
CEPAGRI	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura
DAQ	Aquisição de dados
EPDM	Etileno-Propileno-Dieno-monômero
EPS	Polietileno expandido
ESAB	Laboratório de Agroclimatologia da Escola Superior Agrária de Bragança
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
UDF	Função Definida pelo Usuário
UV	Ultravioleta

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Temperaturas de uso (°C) e eficiências (%) para a cidade do Porto.	6
Tabela 2.2 – Temperaturas de uso e eficiências para as cidades de Fortaleza e Rio de Janeiro.....	7
Tabela 2.3 – Dados da simulação no inverno do Porto e de Fortaleza [5].	9
Tabela 2.4 – Avaliação do coletor.	10
Tabela 2.5 – Principais resultados obtidos nos trabalhos pesquisados de sistemas de aquecimento solar de água.	15
Tabela 2.6 – Instrumentos de medição utilizados nos trabalhos pesquisados.	15
Tabela 3.1 – Propriedades do aço estrutural [12].....	35
Tabela 3.2 – Detalhes da malha.....	41
Tabela 3.3 – Qualidade dos elementos da malha tetraédrica.	42
Tabela 3.4 – Estatísticas da malha.	43
Tabela 3.5 – Propriedades do PVC.....	44
Tabela 4.1 – Relação da massa de cada componente da estrutura do reservatório.	60
Tabela 4.2 – Forças atuantes nas estruturas.	60
Tabela 4.3 – Avaliação do coletor para a primeira hora de operação.	81

1. INTRODUÇÃO

A busca por maior eficiência energética, juntamente às políticas de desenvolvimentos econômico e sustentável incentivou o estudo de novas técnicas de produção de energia através de fontes renováveis, destacando-se a utilização da energia solar.

Procura-se inovar os produtos existentes no mercado com o desenvolvimento de um coletor solar flexível e de baixo custo. A finalidade é obter um melhor aproveitamento da energia solar que é abundante, inesgotável e sem custos e disponibilizar os sistemas de aquecimento de água a todas as pessoas, seja para as suas residências ou para outras atividades.

Os sistemas de aquecimento solar podem ser instalados para aquecer água sanitária de uso doméstico e industrial, piscinas e como apoio aos sistemas de aquecimento central. É possível, também, aquecer o ar usado na secagem de produtos ou ambientes.

A energia solar influencia quase todas as outras fontes de energia, tais como hidráulica, biomassa e eólica. Além disso, o aproveitamento direto da radiação solar consiste na geração de potência por meio de duas tecnologias: fotovoltaica e térmica. Os sistemas fotovoltaicos utilizam um painel fotovoltaico e geram energia elétrica. Já os sistemas térmicos utilizam um coletor para aquecer um fluido [1].

Um sistema de aquecimento solar de água é composto por: coletor solar, reservatório térmico, tubagens, conexões hidráulicas e utilizam água como fluido de trabalho. O coletor solar é um permutador de calor que transfere a energia da radiação solar para a água que circula no seu interior. A radiação é absorvida pelos canais do coletor e o calor é transferido para a água através de convecção.

Em eventos de curta duração, como em festivais ou acampamentos temporários, a água aquecida para banho nem sempre está disponível, ou quando existe requer a instalação de estruturas complexas. Além disso, em comunidades carentes, especialmente de países como o Brasil que usa energia elétrica para aquecer água por meio de chuveiros, o simples conforto de tomar banho quente não é possível para todas as pessoas.

Embora encontra-se no mercado várias opções de sistemas de aquecimento solar de água, seus preços são elevados (variam desde 999,00€ a 4.000.00€, dados de abril de 2020), tornando-se financeiramente inviável para as pessoas carentes.

Ademais, nos sistemas de aquecimento de água através de energia elétrica, identifica-se uma incoerência no processo. A energia elétrica pode ser gerada a partir de diversas alternativas, como solar, termoelétrica e nuclear. Associado aos custos de uso, têm-se os custos de transporte, de distribuição e de comercialização da energia. Isto é, gasta-se uma unidade de energia térmica para produzir uma unidade de energia elétrica, somado a todos os custos do processo, para obter novamente no final uma unidade de energia térmica para aquecer água.

O presente trabalho reporta o desenvolvimento de um coletor solar flexível e de baixo custo, com fáceis transporte, montagem e adaptação em qualquer superfície e a análise do seu desempenho térmico, quando inserido num sistema de aquecimento solar de água instalado na cidade de Bragança, Portugal.

1.1. Enquadramento Histórico

As evidências apontam que o início da utilização da energia solar ocorreu no século VII a.C., onde as pessoas focalizavam a radiação solar com materiais de vidro para acender fogueiras. As primeiras experiências para aquecer a água através da energia solar foram documentadas pelo suíço Horace de Saussure no ano de 1767, que utilizou uma caixa com cobertura de vidro, conhecida como “a caixa quente de Saussure” [2]. Em 1891, Clarence Kemp patenteou a invenção do primeiro aquecedor solar de água comercial, nomeando-o de Climax. Entretanto, o Climax não mantinha

a água quente por muito tempo, então, em 1909, o americano William J. Bailey, separou o aquecedor solar em dois componentes: um elemento de aquecimento exposto ao sol e uma unidade de armazenamento colocada no interior da casa [3].

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi projetar um coletor solar flexível e analisar seu desempenho térmico.

Os objetivos específicos que foram requisitos necessários para alcançar o objetivo geral foram:

- projetar um protótipo funcional do coletor solar flexível;
- projetar uma bancada para testes;
- projetar um reservatório térmico;
- selecionar os instrumentos de medição para o sistema;
- fabricar a bancada e o reservatório e montá-los no sistema de aquecimento solar de água;
- adaptar um protótipo não funcional do coletor solar flexível para que pudesse ser testado; e
- simular o modelo do protótipo funcional.

1.3. Organização do texto

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos.

O Capítulo 1 aborda a introdução ao trabalho, contendo o enquadramento histórico dos coletores solares, justificativa, objetivos, organização do texto e uma nota final.

O Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, composta pelo estado da arte e por um estudo sobre permutadores de calor e sistemas de aquecimento solar de água.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e os métodos utilizados para projetar e construir o sistema de aquecimento solar de água e atingir os objetivos propostos neste trabalho.

O Capítulo 4 mostra os resultados e as discussões obtidos com os projetos do coletor solar e da bancada e com o teste numérico, como a potência calorífica e a eficiência do coletor.

O Capítulo 5 contém as conclusões e algumas propostas para futuros trabalhos.

1.4. Nota final

Destaca-se que a proposta inicial desse trabalho consistia na realização de testes reais da operação do coletor solar flexível desenvolvido. Contudo, diante da situação imposta pela pandemia do novo coronavírus (SARS-COV-2) e da necessidade da população adoptar medidas de distanciamento social para conter a pandemia, o Instituto Politécnico de Bragança elaborou um plano de contingência e uma das medidas foi o fechamento temporário dos laboratórios. Diante disso, os testes não puderam ocorrer. A solução encontrada para não comprometer a conclusão do trabalho consistiu na realização de simulações numéricas para as condições meteorológicas da cidade de Bragança.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo fornece uma base dos principais conceitos para sustentar a compreensão desse trabalho. Ele é composto por três seções: estado da arte, que contém os trabalhos precedentes e os estudos atuais dos coletores solares; permutadores de calor que aborda a definição, os tipos e o método numérico de análise e, por último, um estudo direcionado aos sistemas de aquecimento solar de água.

2.1. Estado da arte

A partir da década de 1970, muitos novos coletores solares começaram a aparecer no mercado influenciados pela crise do petróleo. Foram necessárias informações sobre como um coletor absorve energia, como perde calor, os efeitos do ângulo de incidência da radiação solar e os efeitos significativos da capacidade térmica. Em resposta, vários trabalhos foram desenvolvidos.

Nesta secção serão abordados os dois trabalhos precursores do desenvolvimento do coletor solar flexível e os estudos relacionados ao projeto proposto.

2.1.1. Trabalhos precedentes

O estudo para o desenvolvimento do coletor solar flexível e de baixo custo iniciou-se com [4] e seguido por [5].

A ideia inicial consistiu em desenvolver um coletor modular, flexível e fabricado com materiais de baixo custo, que fosse de fácil transporte, possível de ser instalado em várias superfícies e com baixo custo de aquisição [4].

O modelo do coletor consistiu em três partes principais: camada de cobertura transparente, camada absorvedora e camada para isolamento. Selecionou-se o filme de poliuretano (PU) como material para compor a camada de cobertura e a placa absorvedora devido às suas propriedades térmicas e ao seu preço acessível. Para a camada isolante, o material selecionado foi a espuma elastomérica à base de borracha Etileno-Propileno-Dieno-Monômero (EPDM).

O coletor foi modelado no software SolidWorks e o seu desempenho simulado no software Ansys com o método de elementos finitos, inserido em dois diferentes sistemas de aquecimento de água composto por tubos e um reservatório térmico com capacidade de 150 litros. O primeiro sistema era composto por um coletor e o segundo por dois coletores ligados em série. As simulações foram feitas para cinco diferentes condições e ignoraram o consumo de água durante o dia. Dentre as cinco, três correspondem ao verão, outono e inverno do Porto, Portugal, onde o uso da água aquecida é necessário durante o ano todo. As outras duas referem-se às simulações feitas para a cidade de Fortaleza e Rio de Janeiro, Brasil, supondo que o uso da água aquecida seria necessário apenas no inverno.

Como resultados, obteve-se para a cidade do Porto, ao fim do dia, as temperaturas da água de uso, apresentadas na Tabela 2.1, para o verão, o outono e o inverno.

Tabela 2.1 – Temperaturas de uso (°C) e eficiências (%) para a cidade do Porto.

	Verão	Outono	Inverno	Eficiência
1 coletor	35,6	31,3	30,9	77,3
2 coletores	49,4	41,6	40,2	78,3

Para as cidades de Fortaleza e Rio de Janeiro, os sistemas simulados com um e com dois coletores no inverno tiveram os resultados apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Temperaturas de uso e eficiências para as cidades de Fortaleza e Rio de Janeiro.

		T_{sai} (°C)	T_{uso} (°C)	Eficiência (%)
Fortaleza	1 coletor	59,1	35,3	79,8
	2 coletores	91,1	49,1	85,2
Rio de Janeiro	1 coletor	63,4	38,0	65,1
	2 coletores	92,1	52,4	76,0

Nas situações em que a temperatura no coletor foi maior que 70°C, recomendou-se o aumento do volume do reservatório térmico para que o sistema não sobreaqueça, ultrapassando o limite de temperatura que o material suporta.

Em todas as situações, observou-se o aumento na taxa de aquecimento da água de uso associado ao aumento do fluxo de calor. O caudal mássico também foi influenciado pela intensidade da radiação solar, onde maiores fluxos aumentaram as forças de impulsão do fluido no interior da placa, intensificando o efeito termossifão e elevando o caudal mássico.

Posteriormente, dois modelos de coletores solares flexíveis de baixo custo foram desenvolvidos. Os modelos foram criados no software SolidWorks e simulados no software Ansys em dois sistemas: com um coletor e com dois coletores ligados em paralelo, desprezando o consumo de água durante o dia [5].

Nas quatro extremidades do coletor foram feitos furos nas laterais dos canais para inserir tubos roscados que permitem ligar o coletor em série ou em paralelo com outros coletores, além de servir para ligar o coletor com o reservatório. Os tubos roscados com 15 mm de diâmetro foram presos e vedados na placa através da aplicação de cola vedante. Ainda, projetou-se quatro tiras retangulares com ilhós nas extremidades da placa absorvedora, cuja função é permitir a fixação do coletor.

O primeiro modelo de coletor solar possui sete canais de aquecimento de água, com 900 mm de comprimento, com seção transversal em meia circunferência, 100 mm de largura e 30 mm de altura. Nas medidas externas, o coletor possui 1160,0 mm de comprimento e 708,4 mm de largura e comporta o volume de 18 litros de água.

A Figura 2.1 mostra o protótipo não funcional que foi fabricado em parceria com a empresa Factory Play de Bragança. Para tanto, necessitou adaptar o coletor para medidas que a empresa conseguisse atender. O modelo demonstrativo foi fabricado com costura, para identificar possíveis oportunidades de melhoria relativas ao seu processo de fabrico. Sua produção ocorreu em três etapas: planificação, que é a conversão do modelo em 3D para 2D; corte e marcação (como locais onde é costurado, indicação onde o velcro é colocado) e costura.



Figura 2.1 – Protótipo não funcional [5].

A partir das oportunidades de melhoria identificadas neste processo de fabrico, projetou-se um segundo modelo de coletor, mantendo a eficiência e a capacidade térmica. Esse coletor também foi constituído por cobertura transparente, camada absorvedora e camada para isolamento.

Para verificar a influência da velocidade no desempenho do coletor, foram feitas simulações para cada estação do ano com velocidades de 0,06 m/s, 0,04 m/s e 0,02 m/s e a temperatura da água na entrada do coletor a 20°C. As simulações foram

realizadas para o primeiro e o segundo modelos nas cidades de Porto e Fortaleza. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Dados da simulação no inverno do Porto e de Fortaleza [5].

Local	Sistema	T de uso (°C)		T de saída (°C)		Caudal mássico (kg/s)	
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
Porto	1 coletor	30,66	30,61	38,89	37,62	0,00754	0,00621
	2 coletores	40,08	39,77	49,63	48,96	0,00944	0,00852
Fortaleza	1 coletor	37,10	38,12	46,48	47,76	0,00783	0,00868
	2 coletores	49,26	49,72	60,93	63,54	0,00801	0,00905

Ainda, o coletor foi simulado isolado para verificar sua eficiência nas condições climáticas para um dia de inverno no Porto e em Fortaleza. A Tabela 2.4 contém os resultados encontrados. A eficiência do coletor foi calculada como a razão do ganho útil em um período específico pela energia solar incidente no mesmo período, através da Equação (2.1).

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A \int I dt} \quad (2.1)$$

onde

- η – eficiência térmica do coletor;
- Q_u – ganho de energia útil,
- A – área do coletor, em m^2 ; e
- I – radiação solar, em W/m^2 ;

Tabela 2.4 – Avaliação do coletor.

Velocidade (m/s)	Diferença de temperatura (°C)		Eficiência (%)	
	Porto	Fortaleza	Porto	Fortaleza
0,06	12,56	19,36	67	66
0,04	17,51	27,91	77	77
0,02	31,38	43,90	89	88

Através dos dados obtidos nas simulações, constatou-se que no Porto é necessário um sistema com dois coletores montados em paralelo, permitindo aquecer a água de uso até 39,77 °C ao fim do dia no inverno. Já para Fortaleza, apenas uma placa já atenderia o abastecimento de uma residência, disponibilizando água de uso a 38,12 °C ao fim do dia. Entretanto, ao considerar um cenário mais realista, onde há perdas de calor e consumo de água durante o dia, concluiu que se necessita de três placas para Porto e duas para Fortaleza, para o abastecimento de uma residência com duas pessoas.

No total foram projetados quatro modelos de coletores solares e feito um protótipo não funcional. A Figura 2.2 mostra a evolução dos modelos dos coletores, sendo o primeiro desenvolvido por [4], o segundo e o terceiro por [5] e o quarto modelo foi desenvolvido no presente trabalho. O protótipo não funcional foi fabricado baseado no modelo (2), para analisar os processos e os problemas de fabrico, que então foram consideradas para projetar o modelo (3).

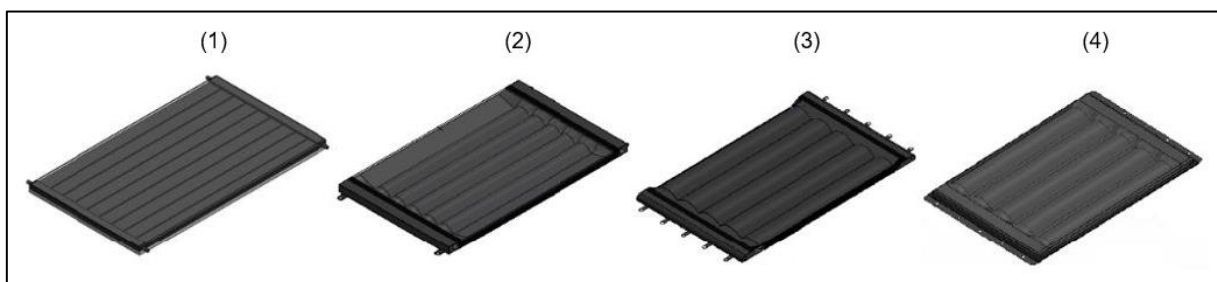


Figura 2.2 – Evolução dos coletores desenvolvidos.

O primeiro modelo apresenta nove canais de aquecimento, o segundo modelo sete, o terceiro e o quarto possuem cinco. A redução de canais foi feita para facilitar a construção. E, apesar desta redução, a temperatura de uso apresentou pequenas variações nas simulações realizadas para cada configuração.

Analogamente ao desenvolvimento do coletor solar flexível e de baixo custo, outros coletores solares vêm sendo desenvolvidos com diferentes materiais e modos de fabricação. Esses estudos contribuem para o crescimento do emprego desses sistemas e maior aproveitamento energético.

Jordan, Seye e Motomiya (2015) avaliaram o efeito do caudal de água no rendimento térmico de um coletor solar plano, construído em termoplástico, para quatro caudais mássicos de água: $0,026 \text{ kg/s}$; $0,04 \text{ kg/s}$; $0,054 \text{ kg/s}$ e $0,068 \text{ kg/s}$. Através dessa experiência mostrou-se que há um caudal ótimo de operação, uma vez que para o caudal de $0,054 \text{ kg/s}$ obteve-se o maior valor de potência térmica de 753 W/m^2 e, para a maior caudal ($0,068 \text{ kg/s}$) a potência térmica se equiparou com o do menor caudal ($0,026 \text{ kg/s}$), 715 W/m^2 . O maior caudal ocasionou um aumento no coeficiente convectivo entre o fluido e o coletor, contribuindo para o aumento da potência térmica do coletor solar até atingir o caudal ótimo do sistema. Acima desse caudal o valor da potência térmica diminui.

Lopo (2010) construiu e analisou o desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo, cujas características principais são, além do baixo custo, fáceis processos de fabrico e montagem. O sistema foi composto por um coletor construído por tubos de PVC, em paralelo, e um reservatório térmico. Estudou-se oito configurações entre a placa absorvedora, isolantes térmicos e reservatórios. A configuração com alhetas e com isolamento térmico de EPS foi a termicamente mais viável, resultando na temperatura da água no reservatório de $41,5^\circ\text{C}$, com um caudal de 21,42 litros/hora e perda térmica de $83,12 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Reis (2009) analisou o desempenho térmico de um coletor que consistiu em cinco placas de forro de PVC ligadas em paralelo pelas extremidades a tubos de PVC e revestidas em uma face com latas de alumínio. O sistema foi testado em duas

configurações: uma com as placas sem revestimento e outra com as placas revestidas com alumínio para determinar a influência do alumínio na eficiência do coletor, para os volumes de reservatório de 150 litros e de 200 litros. Os resultados demonstraram que a maior eficiência se deu para o maior volume do reservatório, devido a menor perda térmica e em função do maior caudal. Sendo assim, a configuração que apresentou o melhor desempenho foi com as placas sem revestimento para o reservatório de 200 litros, onde se obteve a diferença média entre as temperaturas de entrada e de saída do coletor de 11,9°C, eficiência térmica de 40%, temperatura na saída do coletor cerca de 45°C e temperatura média de 44°C no topo do reservatório.

Mendes e Vieira (2008) compararam o desempenho de um coletor solar de baixo custo, construído de PVC, sob as mesmas condições operacionais de um coletor convencional similar. Para o reservatório do sistema com o coletor alternativo, a energia acumulada foi de 6988 kJ e o coeficiente global de troca térmica foi de 3,468 $W/m^2°C$, enquanto no reservatório do coletor convencional a energia foi de 7457 kJ e o coeficiente global de troca térmica foi de 2,456 $W/m^2°C$. O estudo mostrou que o coletor solar de baixo custo é tecnicamente viável para o aquecimento doméstico de água, uma vez que, posto nas mesmas condições operacionais de um coletor solar convencional, apresentou valores similares de temperatura, respectivamente, 41,8°C e 43,2 °C, e eficiência de aquecimento 47,4% e 50,6%.

Lourenço (2012) estudou 25 coletores solares térmicos com base na norma europeia EN 12975-2, através de uma ferramenta de cálculo desenvolvido com o software *Microsoft Excel*[®] para determinar o valor do rendimento e o coeficiente de perdas de calor globais dos coletores por meio das principais características construtivas. Lourenço concluiu em seu estudo que a emissividade da camada absorvedora influencia no rendimento de um coletor solar térmico, tendo em vista um coletor que apresenta o valor de emissividade mais baixo, melhora o aproveitamento da energia térmica, resultando em coeficientes de perda de calor mais baixos. O ângulo ótimo do coletor para se atingir a eficiência máxima será com o ângulo igual à latitude do local. Outro fator que influencia, sobretudo, o coeficiente de perdas de calor é a velocidade do vento, que, quanto maior é a velocidade do vento, maior serão as perdas de calor por convecção, reduzindo, ainda, o efeito da absorção do coletor solar.

Leephakpreeda (2010) estudou a eficiência da conversão da energia solar em energia térmica num coletor solar do tipo placa plana. Para tanto, descreveu o modelo termodinâmico do sistema e avaliou o desempenho em termos de eficiência na conversão da energia. Para a radiação solar de 800 W/m^2 e a temperatura na entrada do coletor de 33°C , obteve-se a temperatura à saída de 43°C , enquanto a temperatura no reservatório obtida foi 38°C . Esse estudo apontou que a eficiência de conversão é máxima quando a razão entre a diferença de temperaturas do fluido de trabalho (T_f) e do ambiente (T_a) pela radiação solar incidente (I), $\left(\frac{T_f - T_a}{I}\right)$, aproxima-se de zero. Os resultados indicaram também que a eficiência de conversão é proporcional à razão entre a diferença média de temperatura do fluido de trabalho e a temperatura ambiente, pela radiação solar.

Jurado (2004) criou um modelo dinâmico de um sistema solar do tipo termosifão que foi validado com base nos dados coletados num protótipo. O sistema simulado estava constituído por dois coletores e um reservatório. Nas simulações, variou-se o ângulo nos valores de 10° , 20° , 25° e 30° , sendo o melhor dentre eles o ângulo de 20° , que coincidiu com a latitude do local. Para essa inclinação, obteve-se uma quantidade de calor armazenado de 595 MJ e as temperaturas no topo do reservatório variaram entre 50°C e 60°C . Os resultados obtidos nas simulações para os ensaios realizados apresentaram um erro relativo de 9% . Esse estudo comprova que a melhor inclinação para a instalação de coletores solares é igual à latitude do local.

Cristofari et al. (2002) modelaram e desenvolveram um coletor solar para aquecimento de água fabricado com material copolímero. Selecionou-se o policarbonato anti-UV-tratado por ser o polímero mais barato e por satisfazer os requisitos químico, mecânico e térmico. O uso de material copolímero reduziu o peso do coletor em 50% , comparando-se com um coletor convencional de metal. Para um dia de verão e para um dia de inverno, sem a influência do vento, a média da temperatura final no reservatório foi, respectivamente, $48,3^\circ\text{C}$ e $29,9^\circ\text{C}$ e eficiência média no coletor, respectivamente, de 72% e 62% . Para a influência da espessura do isolamento, notou-se uma pequena variação do ganho de energia para uma espessura de isolamento maior que 2 centímetros para dias de inverno e de 3 centímetros para dias de verão;

assim, por razões econômicas, não se mostrou necessária a utilização do isolamento no coletor com espessura maior que 3 centímetros. Para a influência do caudal mássico, a operação com baixo fluxo resultou num ganho de energia de 96% em comparação a elevados fluxos, ocasionando um incremento da temperatura de saída do coletor e um aumento da estratificação no reservatório. Para a influência da espessura da camada do fluido, constatou-se que com a camada de fluido de 5 centímetros, o ganho de energia é cerca de 65% menor que uma camada de fluido com espessura de 1 centímetro. Para o efeito da velocidade do vento, testou-se o valor da velocidade de 0 a 5 m/s, inferindo que para a alta velocidade do vento (5 m/s) induz maior troca de calor. Desse modo, a eficiência média anual foi de 56,5% sem influência do vento é de 49,9% com vento incidindo a uma velocidade de 5m/s e a média anual de produção diária de energia foi de, respectivamente, 5,03 kWh e de 4,38 kWh.

Kalogirou et al. (2019) desenvolveram e validaram uma nova ferramenta de simulação no software TRNSYS para coletores, chamado *Type 99*. Para a validação experimental, dois coletores térmicos comerciais termossifão diferentes foram acoplados no reservatório térmico com volume de 100 litros. A máxima temperatura para o fluido quente no topo do reservatório foi de 65°C, a eficiência térmica máxima foi 0,606; a máxima energia térmica calculada para o fluido de trabalho foi de 884,2 W e o fluxo mássico máximo foi 0,0157 kg/s. Constatou-se que os diâmetros dos coletores solares influenciam o desempenho energético do sistema, demonstrando um fator de otimização de projeto que reduz o tempo do retorno do investimento.

A Tabela 2.5 mostra um sumário dos principais resultados dos estudos relacionados ao sistema de aquecimento solar de água. Os coletores utilizados nesses trabalhos são do tipo placa plana. As colunas são compostas por: autor, ano, temperatura ambiente (T_{∞}), temperatura na entrada do coletor (T_{ent}), temperatura na saída (T_{sai}), temperatura no reservatório térmico (T_{res}), tipo de escoamento, eficiência do sistema (η) e β (+10°) que se refere à inclinação de 10° a mais que a latitude do local que facilita o início do processo de termossifão e ainda compensa a variação anual do declive, fazendo com que a radiação incidente durante todo o ano seja a mais

perpendicular possível. Em todos os trabalhos realizaram-se testes numéricos e, para comprová-los, foram submetidos a testes reais.

Ainda, destaca-se que nos trabalhos que apresentaram testes em diferentes considerações, obtendo resultados distintos, os dados são referentes ao melhor cenário encontrado.

Tabela 2.5 – Principais resultados obtidos nos trabalhos pesquisados de sistemas de aquecimento solar de água.

Autor (es)	Ano	T_∞ (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sai} (°C)	T_{res} (°C)	Tipo escoamento	η (%)	β (+ 10°)
Cristofari	2002	-	-	-	48,3	Circulação forçada	56,5	Não
Mendes e Vieira	2008	-	23,2	41,8	53,0	Termossifão	47,4	Sim
Reis	2009	28,0	29,0	45,0	44,0	Termossifão	40,0	Sim
Lopo	2010	32,0	31,6	42,9	41,5	Termossifão	22,4	Sim
Leephakpreeda	2010	35,0	35,0	43,0	-	Termossifão	49,0	Não
Jordan, Seye e Motomiya	2015	21,3	21,4	23,2	-	Circulação forçada	-	Não

Um levantamento dos instrumentos de medição utilizados nos trabalhos pesquisados no estado da arte está descrito na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Instrumentos de medição utilizados nos trabalhos pesquisados.

Autor (es)	Caudal	Temperaturas	Velocidade do vento	Radiação solar	DAQ¹
Jordan, Seye e Motomiya (2015)	Válvula do tipo gaveta	Sensor Tipo PT-100	Fornecida pela CEPAGRI	Fornecida pela CEPAGRI	Sim
Diez et. al (2019)	-	Sensor Tipo PT-100	-	Piranômetro	Sim
Lopo (2010)	-	Termopar do tipo K/ Termômetro digital	-	Fornecida pelo INPE	-
Reis (2009)	-	Termopar <i>cromel-alumel</i> / termômetro digital	-	-	Sim
Mendes e Vieira (2008)	-	Termopar do tipo T	Anemômetro	Piranômetro	-
Bortoletto e Pezzuto (2012)	-	Sonda externa TMC20-HD	-	-	Sim

Autor (es)	Caudal	Temperaturas	Velocidade do vento	Radiação solar	DAQ ¹
Jurado e Mendonza (2003)	-	Termopar do tipo T	-	Fotocélula	-
Leephakpreeda (2010)	-	Termopar do tipo K	-	Piranômetro	Sim
Jurado (2004)	-	Termopar do tipo T	-	Célula solar SP-100	Sim
Kalogirou (2019)	Ultrassom FTD 21	Termopar do tipo K/ Termômetro digital	-	Piranômetro	-

¹Sistema de aquisição de dados.

2.2. Permutadores de calor

Os permutadores de calor são equipamentos que efetuam a troca de calor entre dois fluidos com diferentes temperaturas, sem que haja a mistura dos fluidos. A taxa de transferência de calor entre os fluidos depende da diferença de temperatura no local [6].

Um coletor solar é um tipo especial de permutador de calor que usa como fonte de calor a energia da radiação do sol. Nesse processo se verifica a transferência do calor através dos três modos: condução, convecção e radiação. O mecanismo de troca de energia entre a atmosfera e o coletor ocorre por radiação, mas o mesmo não ocorre entre o coletor e a água que circula por esta. Neste caso, tem-se condução pelas paredes dos canais do coletor e convecção entre a superfície interna dos canais e o fluido. A condução é diretamente influenciada pela condutividade térmica do material. Já a convecção está relacionada ao coeficiente convectivo e a diferença de temperatura entre a placa e o fluido [7].

Tendo em vista que no funcionamento de um permutador de calor envolve trocas de calor por convecção em cada fluido e condução nas paredes que os separam, convém determinar o coeficiente global de transferência de calor (U), em $W/m^2 \cdot K$, que indica a contribuição desses efeitos na transferência de calor [6].

Os permutadores de calor podem ser modelados como dispositivos de escoamento permanente, tendo em vista que operam por longos períodos sem ter alterações em suas condições de funcionamento. Algumas idealizações podem ser realizadas para simplificar a análise do permutador de calor, não comprometendo sua precisão [6].

De acordo com a primeira Lei da Termodinâmica, a taxa de transferência de calor do fluido quente deve ser igual à taxa de transferência de calor do fluido frio. As Equações (2.2) e (2.3) determinam, respectivamente, a taxa de transferência de calor para o fluido frio e quente

$$\dot{Q} = \dot{m}c_{p,f}(T_{sai,f} - T_{ent,f}) \quad (2.2)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}c_{p,q}(T_{ent,q} - T_{sai,q}) \quad (2.3)$$

onde

- \dot{Q} – taxa de transferência de calor, em W;
- c_p – calor específico, em J/kg·K;
- $T_{f,ent}$ e $T_{q,ent}$ – temperaturas de entrada, em °C ou K;
- $T_{f,sai}$ e $T_{q,sai}$ – temperaturas de saída, em °C ou K; e
- f e q – subscritos que significam frio e quente.

A taxa de transferência de calor pode ser expressa semelhantemente à Lei de Newton do arrefecimento, conforme Equação (2.4)

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (2.4)$$

2.3. Sistema de aquecimento solar de água

Um sistema de aquecimento solar de água é composto por coletor solar, reservatório térmico, tubagens e conexões hidráulicas. Outros equipamentos podem complementá-lo como uma fonte auxiliar de energia, que poderá ser acionada em dias chuvosos ou em períodos em que a conservação da água quente não for efetiva.

2.3.1. Coletores do tipo placa plana

Existem vários tipos de coletor solar disponíveis no mercado. A seleção do tipo de coletor dependerá da necessidade de cada aplicação. Um dos tipos mais simples é o coletor solar de placa plana.

O coletor solar do tipo placa plana é um permutador de calor que transforma a energia da radiação solar em energia térmica. A troca de calor é do tipo ar-água a altas taxas de transferência de calor.

Na distribuição da temperatura num coletor de placa plana, parte da energia solar absorvida pela placa é conduzida para a região dos tubos. A energia é, então, transferida para o fluido e irá aquecê-lo, causando um gradiente de temperatura na direção do fluxo. Para a modelação do coletor várias suposições simplificadoras podem ser feitas, as quais são [8]:

- o desempenho é em estado-estacionário;
- o fluxo de calor através de uma camada é unidimensional;
- existe um fluxo de calor unidimensional através do isolamento;
- os gradientes de temperatura ao redor dos tubos podem ser desprezados;
- os gradientes de temperatura na direção do fluxo e entre os tubos podem ser tratados de modo independente;

- as propriedades são independentes da temperatura; e
- poeira e sujeira no coletor são insignificantes.

2.3.1.1. Componentes de um coletor solar do tipo placa plana

O coletor solar do tipo placa plana é constituído de três partes principais: cobertura transparente, camada absorvedora e camada para isolamento. A Figura 2.3 apresenta esses componentes.

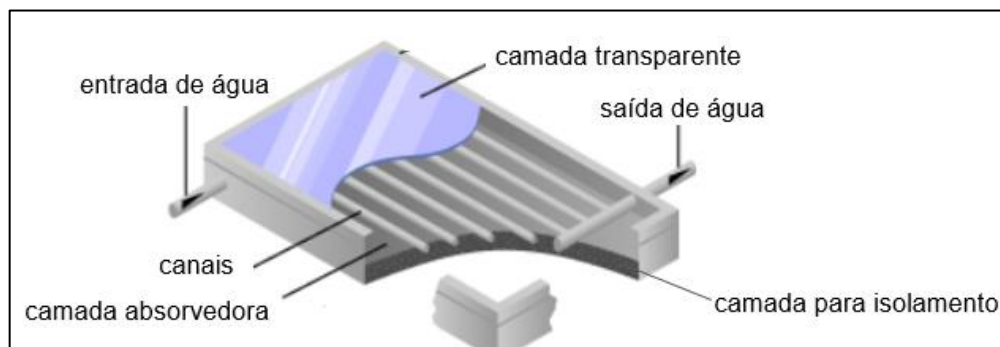


Figura 2.3 – Principais componentes de um coletor solar do tipo placa plana [9] (adaptado).

A cobertura transparente é posicionada no topo do coletor e tem a função de propiciar o efeito estufa e minimizar as perdas de calor por convecção e radiação e proteger da poeira e da sujeira.

A camada absorvedora contém a entrada, a saída e os canais por onde o fluido de trabalho circula e é responsável pela transformação da energia solar em energia térmica.

A camada para o isolamento térmico é posicionada na parte inferior do coletor e permite a inserção de material isolante para evitar as perdas de calor.

2.3.2. Tipos de conexão de coletores solares

Existem dois tipos de conexão para agrupar dois ou mais coletores: em série e em paralelo, que são mostrados na Figura 2.4.

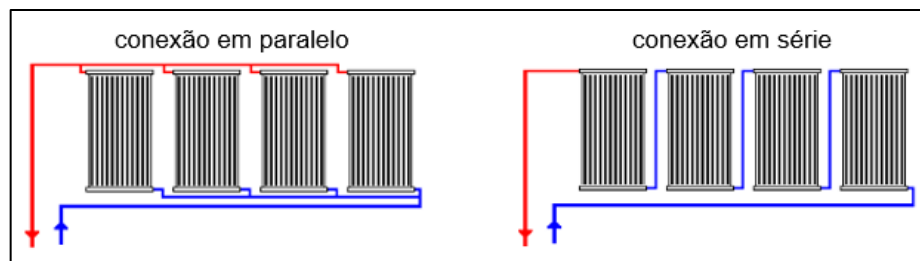


Figura 2.4 – Conexões de coletores solares em série e em paralelo [10] (adaptado).

Na conexão em série, a saída do primeiro coletor é conectada à entrada do próximo e, assim, sucessivamente. A temperatura do fluido de trabalho na entrada de cada coletor será maior do que a temperatura na entrada do coletor anterior, resultando numa temperatura de saída de um grupo de coletores maior do que a temperatura de saída de apenas um coletor. O caudal na saída será o equivalente ao caudal de um único coletor e a perda de carga será equivalente à perda de carga de todos os coletores do agrupamento.

Na conexão em paralelo, as entradas e as saídas de todos os coletores do agrupamento são conectadas. As temperaturas do fluido de trabalho na entrada e na saída de cada coletor será igual, resultando numa temperatura à saída do agrupamento igual à temperatura de um coletor. Hidraulicamente, o caudal na saída do agrupamento é resultado da soma do caudal de cada coletor e a perda de carga é o resultado da perda de carga de apenas um coletor.

Ainda, há instalações que combinam a o arranjo das conexões em série e em paralelo, chamadas de conexões mistas [11].

2.3.3. Congelamento e ebulição nos sistemas de aquecimento de água

O projeto de um sistema de aquecimento solar de água deve levar em consideração o risco de congelamento ou ebulição no coletor solar e nas tubagens. Baixas temperaturas ambientes durante longo período sem radiação solar podem resultar em temperaturas no coletor abaixo de 0°C. Por outro lado, se não houver consumo de água do sistema ou se a bomba de circulação não funcionar durante períodos de alta radiação, a temperatura do coletor poderá exceder 100°C.

Cinco medidas foram desenvolvidas para a proteção dos sistemas contra o congelamento [8]:

1. utilizar produtos anticongelantes que reduzem o ponto de solidificação da água, como o etileno glicol e o propileno glicol;
2. usar o ar como fluido de transferência de calor no ciclo do coletor com um permutador de calor;
3. circular água quente do reservatório que seria destinada ao consumo através do coletor. Esse método deve ser considerado apenas nos climas onde o congelamento é frequente;
4. drenar a água do coletor quando não estiver operando. Esses sistemas podem ser de dois tipos:
 - a. *drain-back* – a água do sistema retorna ao reservatório que não esteja exposto a temperatura de congelamento;
 - b. *drain-out* – a água do sistema é descartada;
5. projetar o coletor e a tubagem para suportar ocasional congelamento, selecionando materiais que expandem caso ocorrer o congelamento da água no seu interior, por exemplo.

Altas temperaturas do coletor também podem ser um problema, pois coletores com altos desempenhos podem operar bem acima do ponto de ebulição da água em condições de não circulação de fluidos, alta radiação e alta temperatura ambiente. Alguns fatores atenuam esse problema, como: incluir válvulas de alívio de pressão,

ventilar o reservatório e adicionar uma solução anticongelante que tenha como característica ponto de ebulição elevado.

2.3.4. Circuito aberto e circuito fechado

O calor pode ser transferido num sistema de aquecimento solar de água por duas opções: sistemas de circuito aberto e sistemas de circuito fechado.

Num sistema de circuito aberto (direto), Figura 2.5, a água é aquecida no coletor e retorna ao reservatório para, então, ser destinada ao uso. Esses sistemas são limitados para áreas com condições climáticas onde o sistema não corre risco de congelamento da água no sistema.

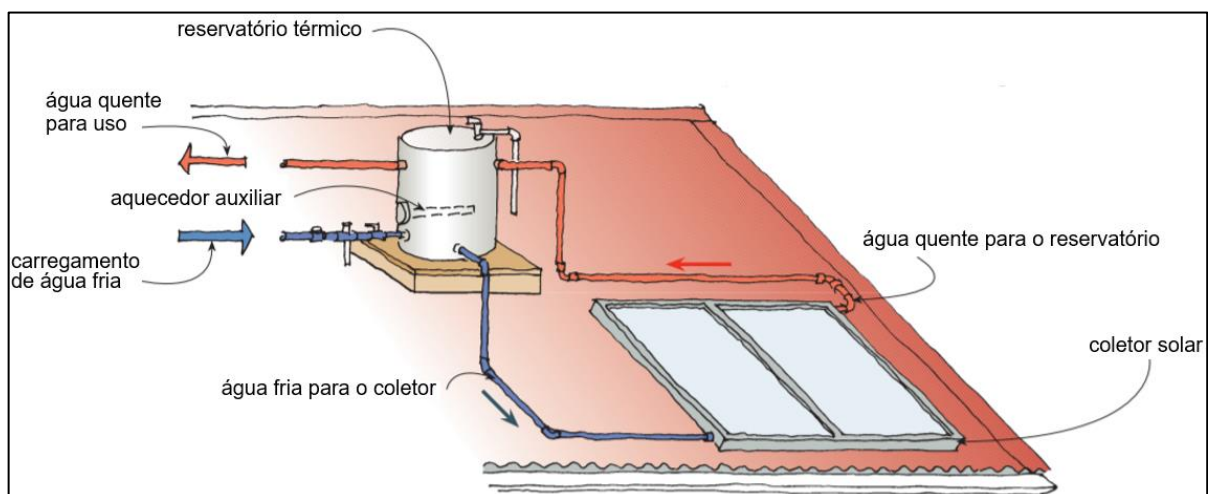


Figura 2.5 – Sistema de aquecimento solar de água de circuito aberto [10] (adaptado).

Num sistema de circuito fechado (indireto), Figura 2.6, um fluido de trabalho circula através do coletor e absorve calor. Esse fluido de trabalho chega até um permutador de calor inserido no reservatório térmico, transferindo o calor absorvido à

água, aquecendo-a. Geralmente, o fluido de trabalho é a mistura de água com anticongelante.

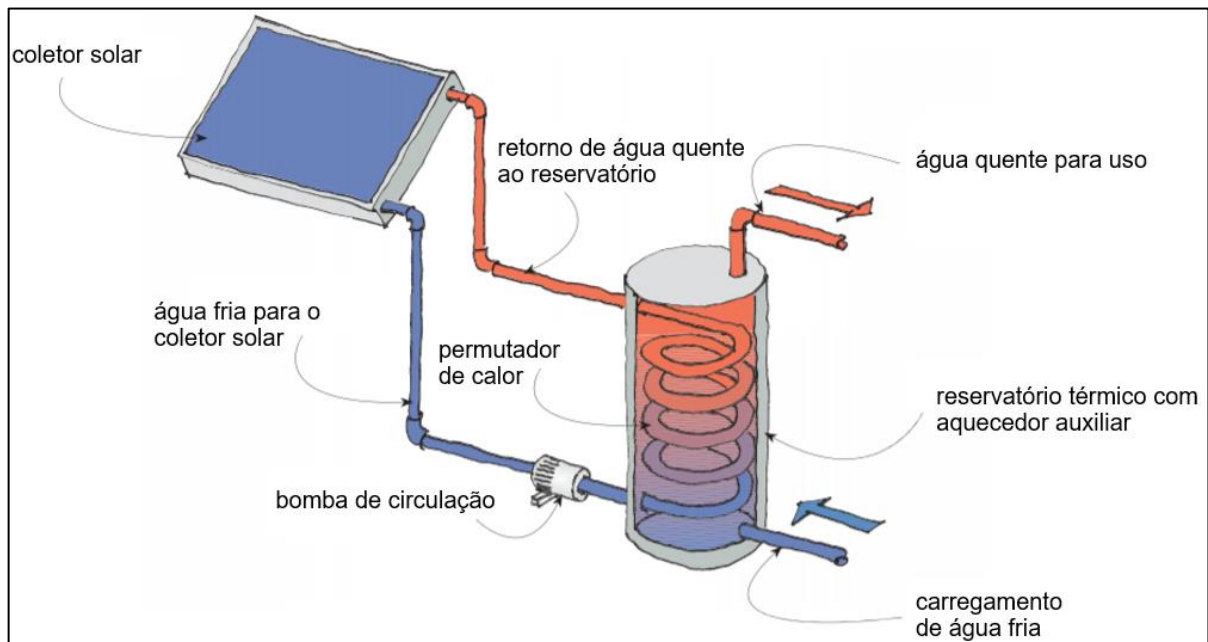


Figura 2.6 – Sistema de aquecimento solar de água de circuito fechado [10] (adaptado).

Os sistemas de circuito fechado são menos eficientes do que os sistemas de circuito aberto, pois há perda de calor no permutador. Sua vantagem é que eles podem usar um anticongelante, sendo mais adequados para áreas propensas ao congelamento da água no sistema [9].

2.3.5. Ativo e passivo

Outra classificação dos sistemas de aquecimento solar de água é em sistema ativo e sistema passivo. Num sistema ativo é necessário o uso de um dispositivo elétrico ou mecânico. Por outro lado, o sistema passivo o escoamento do fluido ocorre pelo efeito termossifão.

2.3.6. Reservatório Térmico

O reservatório térmico tem como principal função armazenar água quente para uso, minimizando ou eliminando as perdas de calor do fluido de trabalho aquecido no coletor solar [8].

As principais características de um reservatório térmico são:

- capacidade de armazenamento por unidade de volume;
- faixa de temperatura de operação;
- estratificação de temperatura;
- potência térmica requerida para adição/remoção de calor;
- meios de controlo das perdas térmicas; e
- custo.

Os reservatórios térmicos podem operar com graus de estratificação, ou seja, a parte superior mais quente do que a parte inferior. O grau de estratificação depende do seu tamanho, localização e caudal à entrada e à saída.

A Figura 2.7 demonstra a circulação do fluido de trabalho no reservatório térmico, onde:

- T_1 , T_2 e T_3 – temperaturas nos nós 1, 2 e 3;
- T_{sai} – temperatura na saída do coletor;
- T_L – temperatura do carregamento;
- \dot{m}_c – caudal do coletor; e
- \dot{m}_L – caudal do carregamento.

Para um reservatório com três nós, o caudal sai da parte inferior para o coletor (nó 3) e do topo para o uso (nó 1). O fluido de trabalho proveniente do coletor retorna para o reservatório no nó que estiver com a temperatura mais próxima à sua, mas menor que a temperatura à saída do coletor.

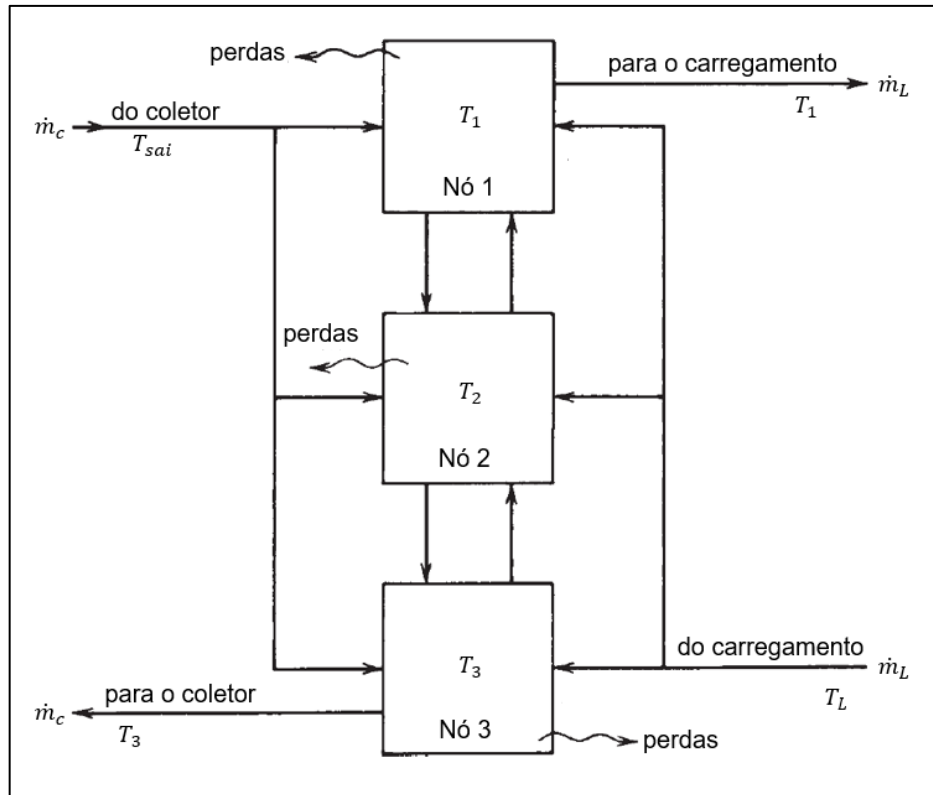


Figura 2.7 – Estratificação de um reservatório em três nós [8] (adaptado).

A divisão de um reservatório em três ou quatro nós é considerada adequada para um projeto conservador. Entretanto, o número de nós necessários para prever adequadamente o desempenho de um reservatório depende da aplicação [8].

O uso de um reservatório vertical é recomendado por proporcionar uma maior estratificação em comparação a um reservatório horizontal.

2.3.6.1. Efeito termossifão

Em sistemas solares de aquecimento de água, o efeito de termossifão é comumente utilizado em substituição a bombas. O princípio desse efeito é a convecção natural do fluido, como o efeito empuxo, ou seja, quando um fluido mais quente e mais

leve, devido sua densidade, sobe; o fluido mais frio, mais denso e, portanto, mais pesado, desce.

Por isso, conforme representado na Figura 2.8, um reservatório térmico para acumulação da água quente é colocado acima do coletor solar.

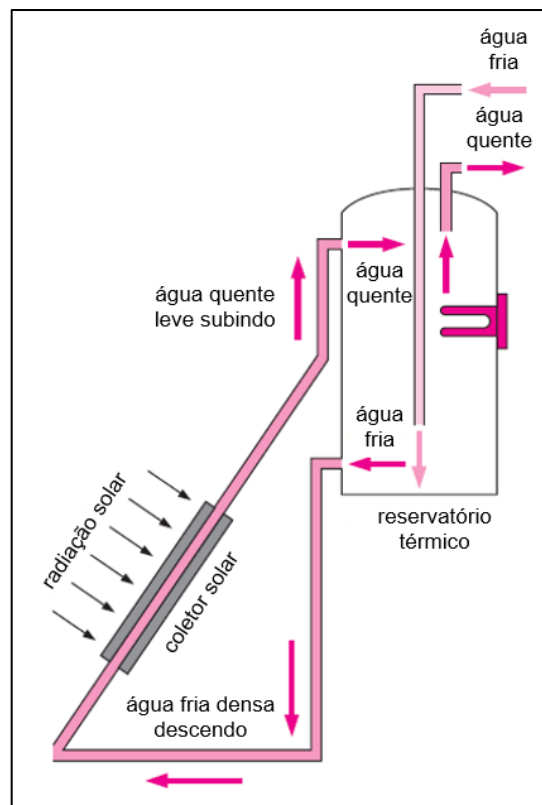


Figura 2.8 – Circulação natural de água num aquecimento solar por termosifão [6].

Esse processo de circulação é contínuo enquanto houver radiação solar. Uma vez sem radiação, não há um ganho de energia e o fluido de trabalho não aquece, fazendo o sistema tender ao equilíbrio térmico através das trocas de calor, o que não gera uma diferença de densidade devido à diferença de temperatura. Sendo assim, se não houver radiação solar ou, ainda, se a temperatura no coletor solar não for superior à temperatura do reservatório térmico, a circulação é interrompida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da descrição da metodologia e os recursos utilizados para obter os resultados necessários para alcançar os objetivos propostos.

3.1. Sistema completo

Considerou-se uma clássica instalação de aquecimento de água solar composta por um coletor solar flexível, um reservatório térmico e água como fluido de trabalho. O escoamento do fluido do coletor para o topo do reservatório e do fundo do reservatório para o coletor ocorre devido ao efeito termossifão. O sistema de aquecimento solar de água montado está apresentado na Figura 3.1.

As tubagens selecionadas para transportar a água entre o coletor e o reservatório foram do tipo multicamadas, de 3/4" de diâmetro, pelos seguintes fatores:

- resistente a altas pressões e temperaturas;
- baixo coeficiente de condutividade térmica;
- não sofre corrosão e não necessita de juntas de dilatação para instalações em água quente; e
- como o material é flexível e permite curvas, elimina a necessidade de conexões hidráulicas.

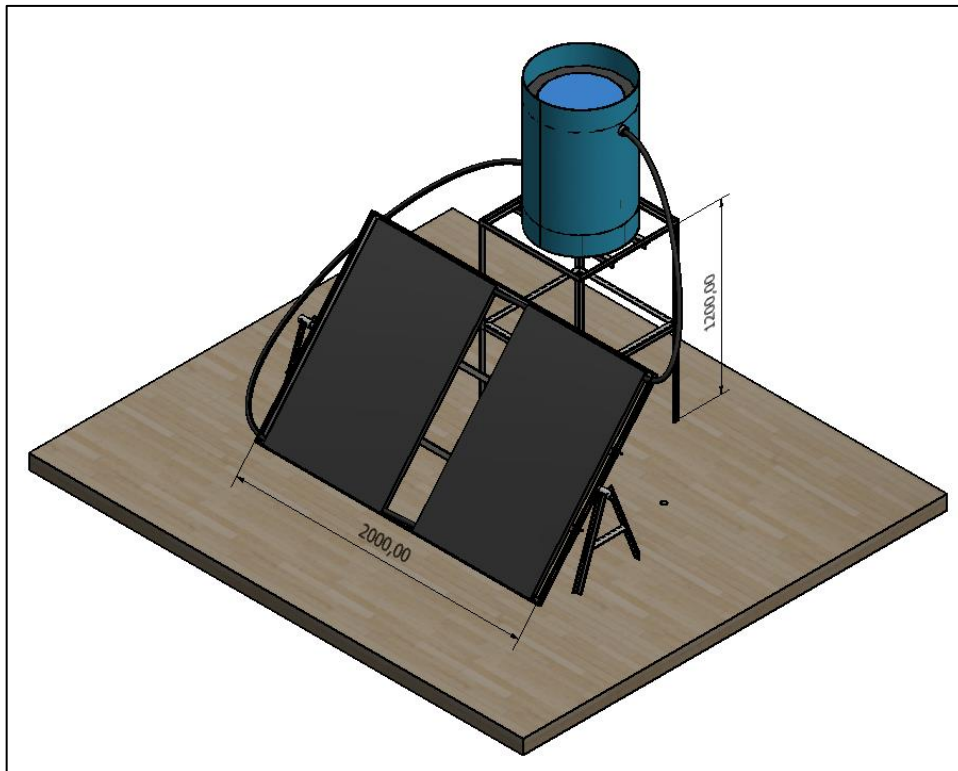


Figura 3.1 – Montagem do coletor solar e do reservatório térmico.

Ainda, para evitar perdas de calor durante o transporte da água entre o coletor e o reservatório, as tubagens foram revestidas com isolamento térmico de polietileno.

A conexão do coletor com o sistema hidráulico é através do canhão depósito roscado presente no interior do coletor e a união multicamada (AP MAN 20 x 1/2 F) ligada à extremidade da tubagem.

3.2. Coletor solar flexível

O modelo do protótipo funcional do coletor solar projetado, demonstrado na Figura 3.2, é fabricado em poliuretano e composto por três partes principais: uma camada transparente, uma camada absorvedora e uma camada para isolamento. A camada transparente tem como função propiciar o efeito estufa e aumentar a

temperatura na superfície absorvedora. A camada absorvedora possui os canais por onde circula a água para ser aquecida. A última, camada para isolamento, está posicionada na parte inferior do coletor, e tem a função de acomodar a camada do isolante térmico, responsável por diminuir as perdas de calor do sistema.

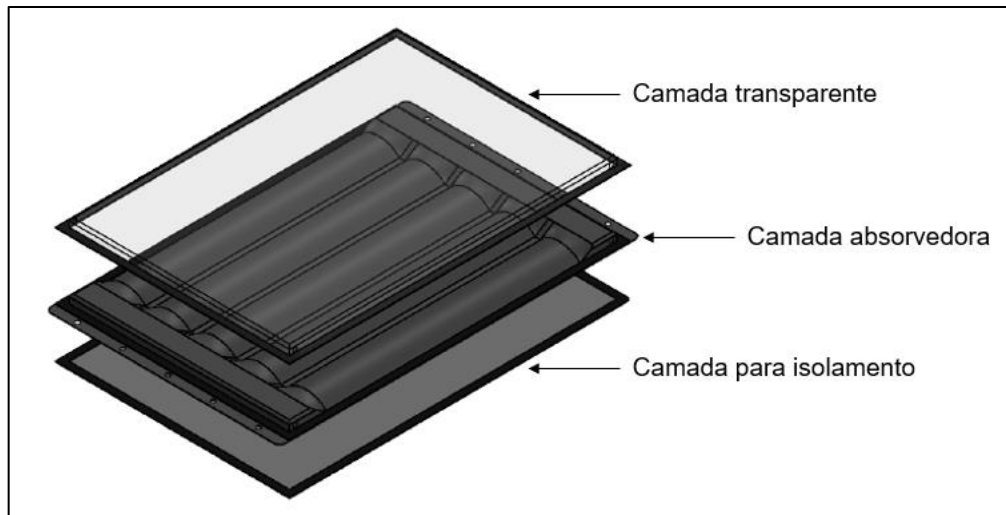


Figura 3.2 – Modelo do protótipo não funcional do coletor solar.

Esse novo modelo de coletor solar flexível foi desenvolvido com base no protótipo não funcional fabricado por [5], incluindo algumas modificações:

- fixação do velcro no coletor;
- vulcanização dos feixes entre os canais e nas laterais do coletor; e
- olhais na camada absorvedora para fixação do coletor.

No protótipo não funcional a fixação do velcro no coletor foi realizada com costura que passavam pelos canais na lateral do coletor, o que inviabilizou o seu uso devido aos vazamentos de água. Por isso, estendeu-se a dimensão da borda lateral do coletor para que o local a ser costurado não esteja mais em contato com os canais.

Entre os canais do coletor será realizado vulcanização, pois é uma região que não pode ser costurada devido à circulação da água em ambos os lados. Como a área

de poliuretano cortada para a camada absorvedora deverá ser maior do que a área da cobertura transparente para ter o material que formará os canais, recomenda-se a utilização de moldes para garantir que os canais fiquem com a forma projetada. Do mesmo modo, nas laterais do coletor será feita vulcanização por estarem em contato com os canais.

Na camada absorvedora, inseriu-se olhais para permitir a fixação do coletor à estrutura em que ele será colocado. Para a colocação dos olhais, estendeu-se as dimensões das bordas superior e inferior do coletor, ao invés de ser costuradas as tiras retangulares de poliuretano como estavam projetadas no modelo feito por [5].

3.3. Bancada para o sistema

Para sustentar o coletor solar e o reservatório térmico, projetou-se e construiu-se uma bancada para o sistema, composta por duas estruturas metálicas: uma estrutura para o coletor e uma estrutura para o reservatório térmico.

O desenvolvimento do projeto visou ser o mais simples do ponto de vista de fabricação, assim como ter o menor custo possível, de modo que atenda aos requisitos do sistema.

3.3.1. Estrutura para o coletor solar

A estrutura para o coletor solar visa sustentar o coletor solar com a inclinação que se obtenha a maior incidência da radiação solar no coletor.

Optou-se por colocar cantoneiras ANSI L (cantoneiras de abas iguais) 35 mm X 4 mm no quadro da estrutura para servir de apoio ao coletor solar, evitando que ele deslize. Ademais, o perfil robusto das cantoneiras oferece a resistência necessária

para sustentar a força exercida pelo peso do coletor. A união das barras de cantoneira foi feita através de solda. O projeto da estrutura foi realizado com o comprimento que permite a colocação de dois coletores.

O apoio em forma de A, apresentado na Figura 3.3, suporta o quadro da estrutura do coletor e permite que a inclinação dos coletores seja variável. A modificação do ângulo é possível através de um mecanismo construído com dois tubos concêntricos colocados entre o apoio e o quadro: o de maior diâmetro é soldado no apoio em A e o de menor diâmetro é soldado no quadro da estrutura. Dois parafusos de pressão travam o movimento rotacional dos tubos quando a inclinação do coletor estiver definida. A altura do apoio em A foi estabelecida para permitir a inclinação de um ângulo até 60° entre o coletor e a horizontal.

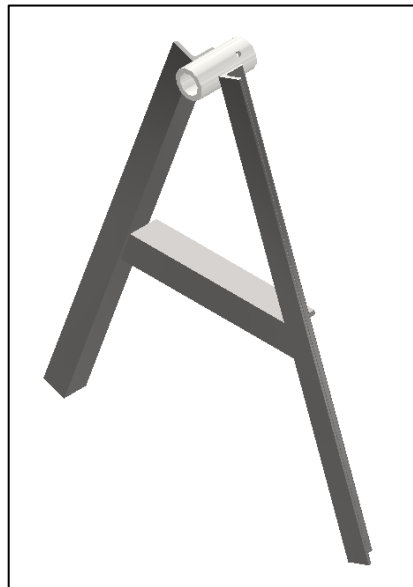


Figura 3.3 – Apoio em forma de A.

3.3.2. Estrutura para o reservatório térmico

Semelhantemente às escolhas feitas na estrutura para o coletor solar, optou-se pelo uso de cantoneiras na estrutura para o reservatório térmico. Todas as seções

de cantoneira são unidas com solda. Para oferecer mais segurança e integridade à estrutura, colocou-se reforços nos pés da estrutura.

A estrutura foi projetada para manter o reservatório num ponto mais alto que a parte superior do coletor para auxiliar o efeito termossifão.

3.3.3. Reservatório térmico

No reservatório térmico será armazenada a água aquecida através do coletor solar. O reservatório é constituído por dois depósitos cilíndricos de diferentes tamanhos, colocado concentricamente, e de isolante térmico. Os depósitos selecionados possuem capacidades, respectivamente, de 125 e 230 litros. A discrepância entre os diâmetros deixa um espaço que será usado para colocar o isolamento que promove a eficiência térmica, como está apresentado na Figura 3.4.

O material isolante escolhido foi a lã de rocha, pois possui um excelente desempenho térmico, cujo coeficiente de condutividade térmica é de $0,035 \text{ W/m.K}$.

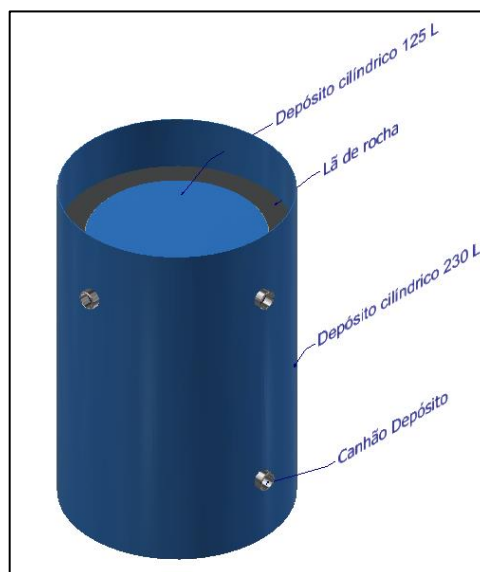


Figura 3.4 – Representação do modelo do reservatório térmico.

A Figura 3.5 mostra os componentes hidráulicos utilizados para conectar o reservatório às tubagens. Na entrada e na saída do reservatório colocou-se um canhão depósito (especificação: M x F de latão 1.1/4" x 3/4") conectado à uma união multicamada (AP MAN 20 x 20) para acoplar na tubagem. Entre eles, um anel de vedação o'ring foi inserido para evitar eventuais vazamentos de água.

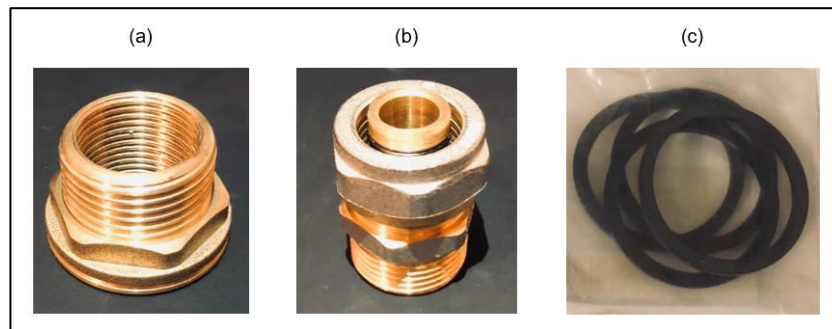


Figura 3.5 – Componentes do reservatório térmico: (a) canhão depósito, (b) união multicamada e (c) anel de vedação o'ring.

3.3.4. Forças atuantes na bancada

Para realizar a análise numérica foi necessário determinar as forças peso e de arrasto exercidas na bancada.

A massa de água contida no coletor pode ser calculada pela Equação (3.1)

$$m = \rho \times v \quad (3.1)$$

onde

m – massa da água contida no coletor, em kg

- ρ – densidade da água, em kg/m^3 ; e
- v – volume de água, em m^3 .

A força peso foi calculada pela Equação (3.2)

$$W = m \times g \quad (3.2)$$

onde

- W – força peso, em N;
- m – massa, em kg; e
- g – gravidade, em m/s^2 .

Para calcular a força de arrasto exercida pelo vento na estrutura, utilizou-se a Equação (3.3)

$$F_a = \frac{c_a \times \rho \times A \times V^2}{2} \quad (3.3)$$

onde

- F_a – força de arrasto, em N;
- c_a – coeficiente de arrasto;
- A – área em que a força é aplicada, em m^2 ; e
- V – velocidade de escoamento do fluido, em m/s.

3.3.5. Análise numérica da bancada

A análise numérica das estruturas que compõem a bancada foi feita no software Ansys Workbench no ambiente *Static Structural* para análise de tensão e deformação. Inseriu-se no modelo as condições de fronteira de suporte e de força.

O material atribuído foi o aço estrutural presente na biblioteca do Ansys. As propriedades desse material estão na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades do aço estrutural [12].

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	7850	kg/m ³
Tensão de cedência	2,5E+08	Pa
Tensão de compressão	2,5E+08	Pa
Tensão de ruptura	4,6E+08	Pa

3.4. Instrumentação

Os dados necessários para a avaliação do desempenho do coletor são: temperatura na entrada e na saída do coletor, caudal mássico, radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento.

Para as medições das temperaturas na entrada e na saída do coletor, seleccionou-se termopares do tipo T. Para medir o caudal, o instrumento escolhido foi um sensor de pulso de fluxo de água DN 20 G3/4. Durante os testes, os instrumentos são conectados a um sistema de aquisição de dados.

Os dados meteorológicos como radiação solar, velocidade do vento e temperatura ambiente foram fornecidos pelo Laboratório de Agroclimatologia da Escola Superior Agrária de Bragança (ESAB), do Instituto Politécnico de Bragança.

3.5. Avaliações energéticas e rendimento do coletor

A avaliação energética do coletor é baseada no perfil de temperatura da água na entrada e na saída durante o dia.

O balanço de energia indica a distribuição da incidência da energia solar em função do ganho de energia útil e das perdas térmicas, e descreve o desempenho do coletor.

3.5.1. Potência calorífica

Nos processos em que ocorre a transferência de energia entre sistemas, a energia fornecida por uma fonte não é totalmente aproveitada por um receptor, sendo uma parte perdida. Deste modo, a energia útil é aquela que de facto realiza trabalho num dado momento, ou seja, que efetivamente aquece a água.

O balanço energético é utilizado como referência de análise para a diferença de energia do fluido de trabalho na entrada e saída do coletor solar e a radiação solar recebida. A potência calorífica é obtida pela Equação (3.4)

$$\dot{Q}_u = \dot{m}c_p(T_{sai} - T_{ent}) \quad (3.4)$$

onde,

- \dot{Q}_u – potência calorífica, em W;
- \dot{m} – caudal mássico, em kg/s;
- c_p – calor específico da água, em J/kg·K; e
- T_{sai} e T_{ent} – temperaturas na entrada e na saída do coletor, em °C ou K.

3.5.2. Perda térmica

O coletor, após receber radiação solar, aquece e gera um gradiente de temperatura com o ambiente. Esse gradiente de temperatura transfere a energia captada pelo coletor para o ambiente, caracterizando as perdas térmicas por condução, convecção e radiação. A potência térmica absorvida pelo coletor é determinada pela Equação (3.5)

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha IA \quad (3.5)$$

onde

- \dot{Q}_{abs} – potência térmica absorvida pelo coletor, em W;
- α – absortividade da placa;
- I – irradiação solar, em W/m²; e
- A – área exposta à radiação, em m².

A diferença entre a potência absorvida pela água e a potência calorífica resulta na potência térmica perdida pelo coletor (\dot{Q}_p), em W, descrita na Equação (3.6)

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_u \quad (3.6)$$

O coeficiente global de perdas (U_L), em W/m²K, pode ser determinado pela Equação (3.7)

$$U = \frac{\dot{Q}_p}{A(T_m - T_\infty)} \quad (3.7)$$

onde

- T_m – temperatura média do coletor, em K ou °C; e
- T_∞ – temperatura média do ambiente, em K ou °C.

3.5.3. Desempenho

O desempenho de um processo indica sua eficiência. Assim, a eficiência do coletor é descrita na Equação (3.8)

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{IA} \quad (3.8)$$

onde

- η – eficiência do coletor;
- I – radiação solar instantânea convertida em calor, em W/m²; e
- A – área do coletor, em m².

O desempenho do coletor solar é afetado pelas características técnicas do projeto, como o número de camadas, o material da superfície da camada absorvedora e o isolamento térmico. Também, o desempenho varia de acordo com as condições

climáticas da temperatura ambiente, da velocidade do vento e da radiação solar e será maior quanto menor for a temperatura de entrada do fluido.

3.6. Modelo numérico

Os testes numéricos foram parametrizados com os dados da cidade de Bragança, Portugal, latitude 41° 48' 20" N.

A modelação do coletor solar foi feita no software SolidWorks e as simulações numéricas foram realizadas na plataforma Fluid Flow (Fluent) integrada ao software Ansys Workbench 19.3.

Embora o modelo do coletor solar é composto por três partes principais, considerou-se apenas um volume de água ligado a um reservatório cilíndrico de 150 litros para reduzir o tempo e a complexidade do processamento e as seguintes simplificações foram adoptadas:

- irradiações direta e difusa transformadas em fluxo de calor global;
- fluxo de calor uniforme na face superior da placa, variando apenas em relação ao tempo;
- tubos, reservatório e isolamentos inferior e lateral adiabáticos;
- perda de carga na tubagem foi desprezada;
- fluido incompressível; e
- escoamento laminar.

Após importar o arquivo com a geometria do sistema, duas configurações foram realizadas nas ferramentas de CAD disponibilizadas no Ansys Workbench. A primeira foi no SpaceClaim, onde selecionou-se a opção *share* na análise de *Share Topology*. Assim, o SpaceClaim compartilhou a topologia entre os corpos que têm contato no sistema (coletor, tubagens e reservatório). A topologia compartilhada permitiu obter uma malha conforme os corpos se encontram e garantiu que a interseção dos corpos

fosse mesclada. Também, essa opção foi ativada tendo em vista que a situação em análises envolve fluxo de fluido.

A segunda opção foi realizada no DesignModeler, onde criou-se uma superfície com a função *Named Selection*. Nessa superfície foi inserida, posteriormente, a condição de contorno correspondente à radiação solar.

3.6.1. Inclinação do coletor

O melhor ângulo de inclinação do coletor para o ano todo é igual à latitude do local. Porém, cada estação do ano tem uma adequada inclinação que permite a maior absorção da radiação solar [13].

Para que haja a maior absorção possível da radiação é necessário que o coletor acompanhe o movimento do sol durante o ano. Entretanto, a instalação de um sistema para isso encarece o projeto. Por isso, em sistemas mais simples, o coletor se mantém fixo.

A inclinação ideal para a cidade de Bragança para todo o ano é $41,48^\circ$, que corresponde à latitude do local ($41^\circ 48' 20''$ N). Contudo, adicionou-se 10° para facilitar o início do processo de termossifão e ainda compensar a variação anual da declividade, fazendo com que a radiação incidente seja a mais perpendicular possível [14]. A inclinação de $51,48^\circ$ do coletor foi inserida durante a montagem do modelo do sistema no software Autodesk Inventor.

3.6.2. Malha

A malha do sistema foi gerada após a realização do *setup* que é apresentado na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Detalhes da malha.

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Export Format	Standard
Sizing	
Capture Curvature	Yes
Capture Proximity	Yes
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
Quality	
Smoothing	High
Mesh Metric	Element Quality
Inflation	
Inflation Option	Smooth Transition
Assembly Meshing	
Method	Tetrahedrons

O formato do elemento da malha é tetraédrico. A Figura 3.6 apresenta a qualidade da malha, sendo que 1 é o melhor valor e 0 é o pior valor. A qualidade da malha indica quanto o elemento é deformado em relação à sua condição original geométrica, o que pode causar um desvio da forma ideal.

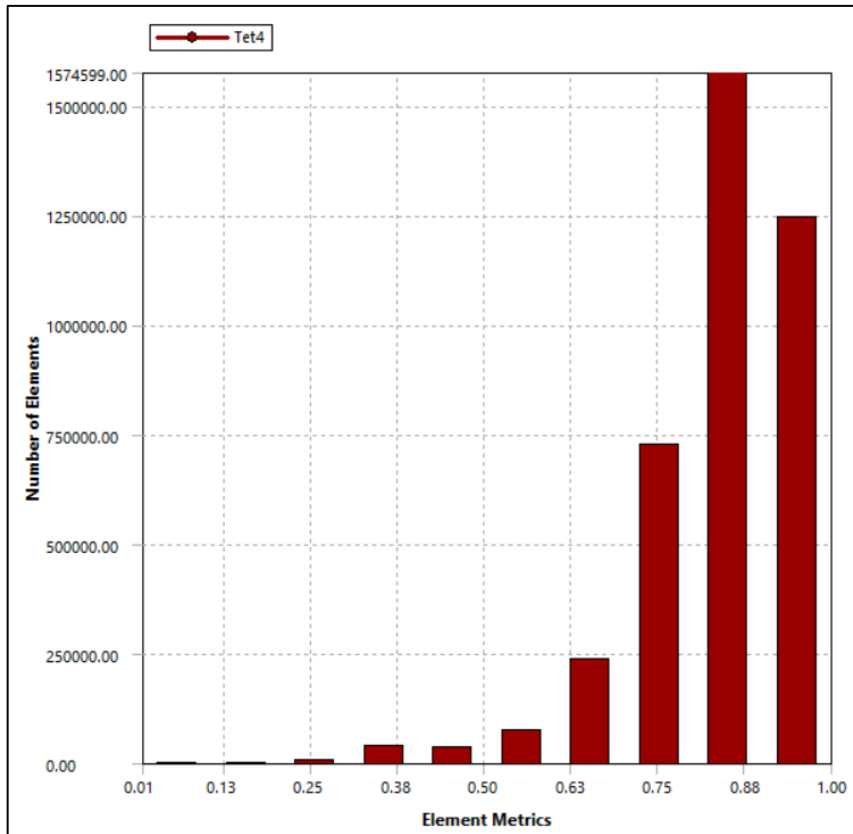


Figura 3.6 – Controlo da malha.

A forma ideal do elemento foi estimada através da função *Element Quality*, onde os valores variam de 0 a 1: 0 se refere à pior qualidade da malha e 1 à melhor qualidade da malha. A Tabela 3.3 apresenta os valores mínimo, máximo e a média da qualidade dos elementos da malha gerada.

Tabela 3.3 – Qualidade dos elementos da malha tetraédrica.

Mínimo	7,2978E-03
Máximo	0,99995
Média	0,83702
Desvio padrão	0,11272

A Figura 3.7 demonstra o refinamento da malha. Verifica-se o aumento da concentração destes nós com a aproximação de regiões curvadas.

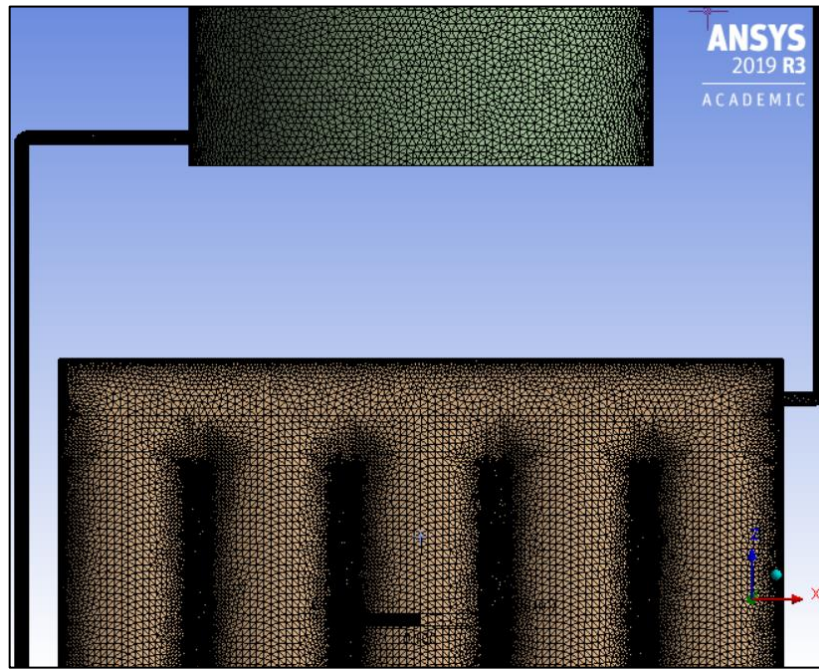


Figura 3.7 – Distribuição dos nós no modelo.

A Tabela 3.4 contém a quantidade de nós e elementos presentes na malha em cada componente do sistema.

Tabela 3.4 – Estatísticas da malha.

Domínio	Nós	Elementos
Coletor solar	221483	1026398
Reservatório	451317	2615555
Tubo direito	27950	125267
Tubo esquerdo	37846	170025
Total	738596	3937245

3.6.3. Configuração do Ansys Fluent

A configuração do projeto numérico fundamentou-se na tese de doutoramento de [15] e nas dissertações de mestrado de [4] e de [5].

O *solver* do sistema foi definido como *pressure-based* que requer menos memória e é aplicado em regimes de fluido incompressível de baixa velocidade. A formulação da velocidade foi definida como absoluta por reduzir a difusão numérica na solução e levar a uma solução mais precisa. Adoptou-se o regime transiente, gravidade no Eixo Z de $-9,81 \text{ m/s}^2$, viscosidade do fluido laminar e ativou-se a função da energia.

Dois materiais foram utilizados nas simulações: água líquida como fluido de trabalho e o poliuretano para o coletor solar. Entretanto, devido à falta dos dados das propriedades do poliuretano, utilizou-se os dados do PVC, apresentados na Tabela 3.5, que foi criado na biblioteca do Ansys Fluent. No reservatório térmico e nas tubagens manteve-se o material padrão do software, pois foram definidos como adiabáticos, não sofrendo influência do material. Alterou-se a massa volúmica da água para *boussinesq*, com valor de $998,2 \text{ kg/m}^3$ e o coeficiente de expansão térmica inserido foi de $0,0002061 \text{ 1/K}$.

Tabela 3.5 – Propriedades do PVC.

Massa específica [kg/m^3]	1290
Calor específico [J/kgK]	1600
Condutividade térmica [W/mK]	0,16

3.6.3.1. Condições de fronteira

O modelo do reservatório e tubagem foram adoptados como volumes de água com superfícies adiabáticas e espessura de parede zero. O isolamento também foi considerado como adiabático, mas com espessura de 0,6 mm, que corresponde à espessura do material a ser utilizado para fabricar o protótipo.

Como o fluxo de calor varia conforme a altura solar, a superfície criada no DesignModeler foi definida com espessura de 0,6 mm e o perfil do fluxo de calor incidente foi inserido através da função *User Defined Functions* (UDF) que corresponde à variação da radiação solar.

Os dados da radiação foram fornecidos pelo Laboratório de Agroclimatologia da Escola Superior Agrária de Bragança (ESAB). Esses dados eram registados a cada 10 minutos pela estação meteorológica da ESAB e, no final de cada dia, calculava-se a média diária da radiação. Com a média da radiação para cada dia, construiu-se um gráfico do qual foi extraída a função, ilustrado na Figura 3.8.

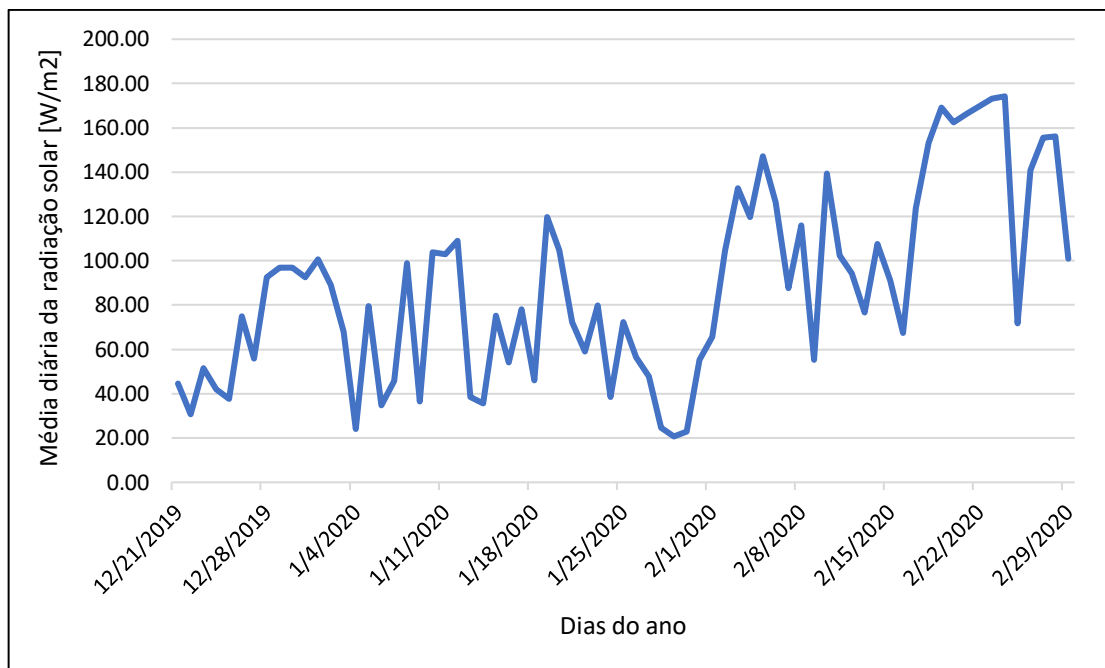


Figura 3.8 – Fluxo de calor na cidade de Bragança durante o inverno de 2019/2020.

A Figura 3.9 apresenta o gráfico do fluxo de calor do dia 01/01/2020 para exemplificar como é o seu comportamento ao longo do dia.

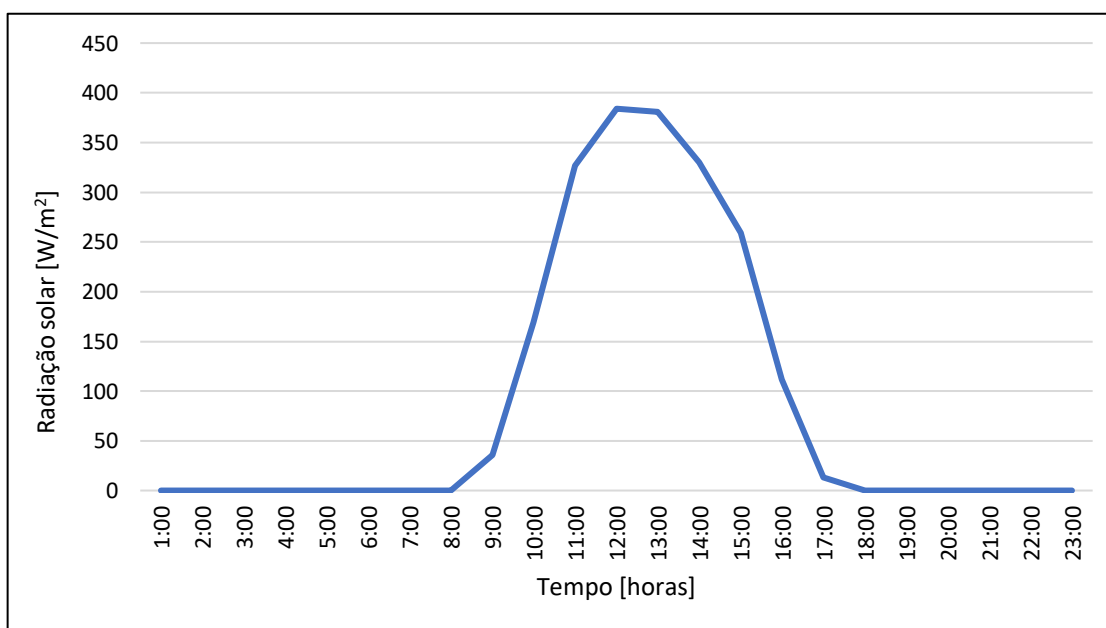


Figura 3.9 – Fluxo de calor de um dia de inverno em Bragança.

A Equação (3.9) representa a função extraída do gráfico. Com essa equação foi criado um arquivo em linguagem C no software Visual Studio para ser compilado no ambiente de simulação do Ansys Fluent como função UDF.

$$I(t) = -(8E - 08)t^6 + (0.0223)t^5 - 2442.6t^4 + (1E + 08)t^3 - (5E + 12)t^2 + (8E + 16)t - (6E + 20) \quad (3.9)$$

onde

- I – radiação solar, em W/m^2 ; e
- t – tempo, em horas.

3.6.4. Configuração da solução

O método de inicialização configurado foi *Hybrid Initialization*. Para incluir o efeito hidrostático e o fluido partir do repouso, ativou-se a opção *Specified Operating Density* com o valor de 0 kg/m^3 . Os valores de referências foram apurados a partir do reservatório e definiu-se o método de solução do seguinte modo:

- Scheme: SIMPLER;
- Skewness correction: 0;
- Gradient: least squares cell based;
- Pressure: body force weighted;
- Momentum: second order upwind;
- Energy: second order upwind; e
- Transient formulation: second order implicit.

Para monitorar o erro residual, alterou-se o critério de convergência para relativo, uma vez que esse critério compara as variáveis em relação a interação anterior, ao invés de comparar com os dados iniciais da simulação. O consumo de água durante o dia foi considerado nulo.

3.7. Adaptação do protótipo não funcional

Como o protótipo do coletor solar fabricado por [5] possui suas partes unidas com costura, torna-se inviável sua utilização. Por isso, a medida adotada para impermeabilizar o coletor foi a aplicação de um selante de costura (*seam sealer*) nas regiões costuradas.

A aplicação do selante ocorre com o auxílio de uma pistola (como a pistola para aplicar silicone) e de fitas adesivas, colocadas nas bordas que limitam o local de aplicação.

3.8. Construção do sistema

A bancada do sistema foi fabricada no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) do Instituto Politécnico de Bragança. Os processos de fabrico foram:

1. corte das cantoneiras com a máquina serrote de fita Optimum, modelo S181 e corte dos chanfros com uma rebarbadora;
2. soldadura, com a máquina de soldadura MIG 453 modular;
3. furação;
4. lixamento; e
5. pintura.

A Figura 3.10 ilustra alguns processos realizados na construção: corte das cantoneiras (a), alinhamento para soldadura (b) e soldadura (c).

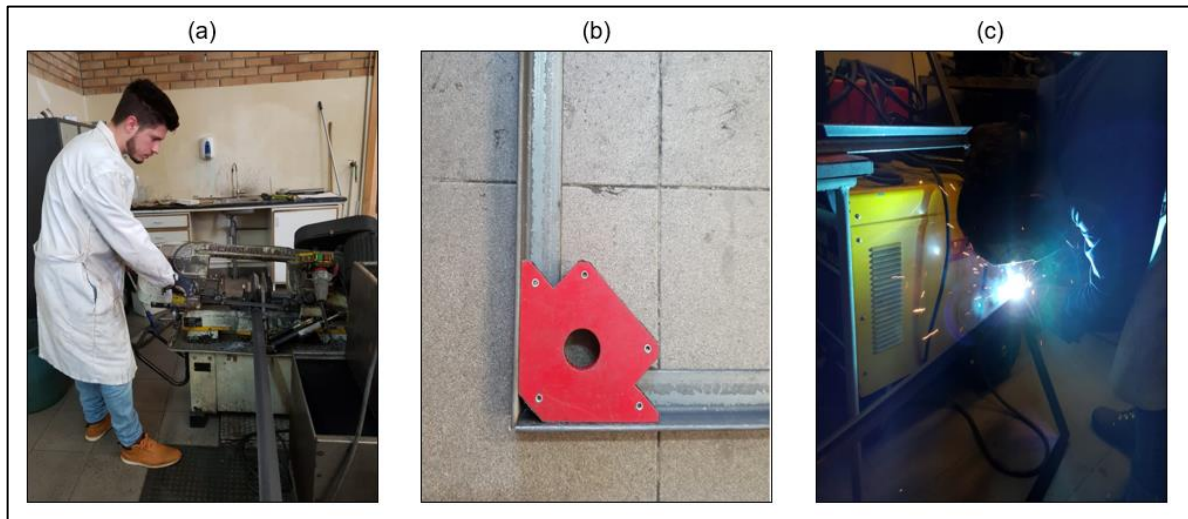


Figura 3.10 – Etapas do processo de fabricação do sistema; (a) corte das cantoneiras, (b) alinhamento e (c) soldadura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com a realização deste trabalho e algumas ponderações são descritas neste capítulo.

4.1. Coletor solar flexível

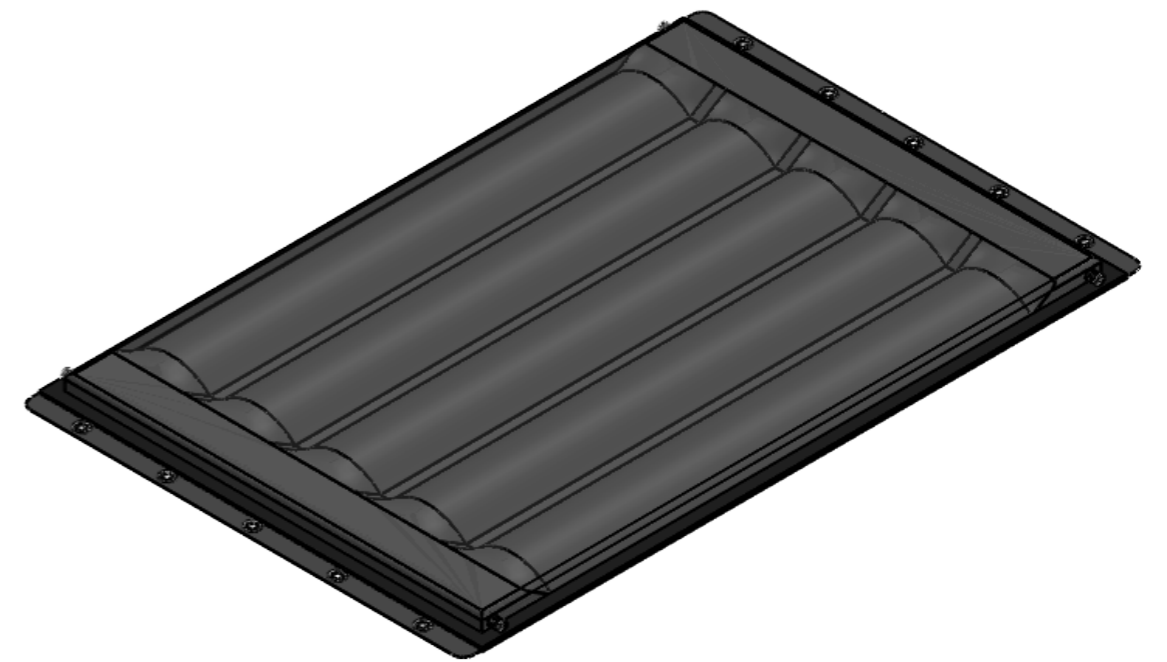
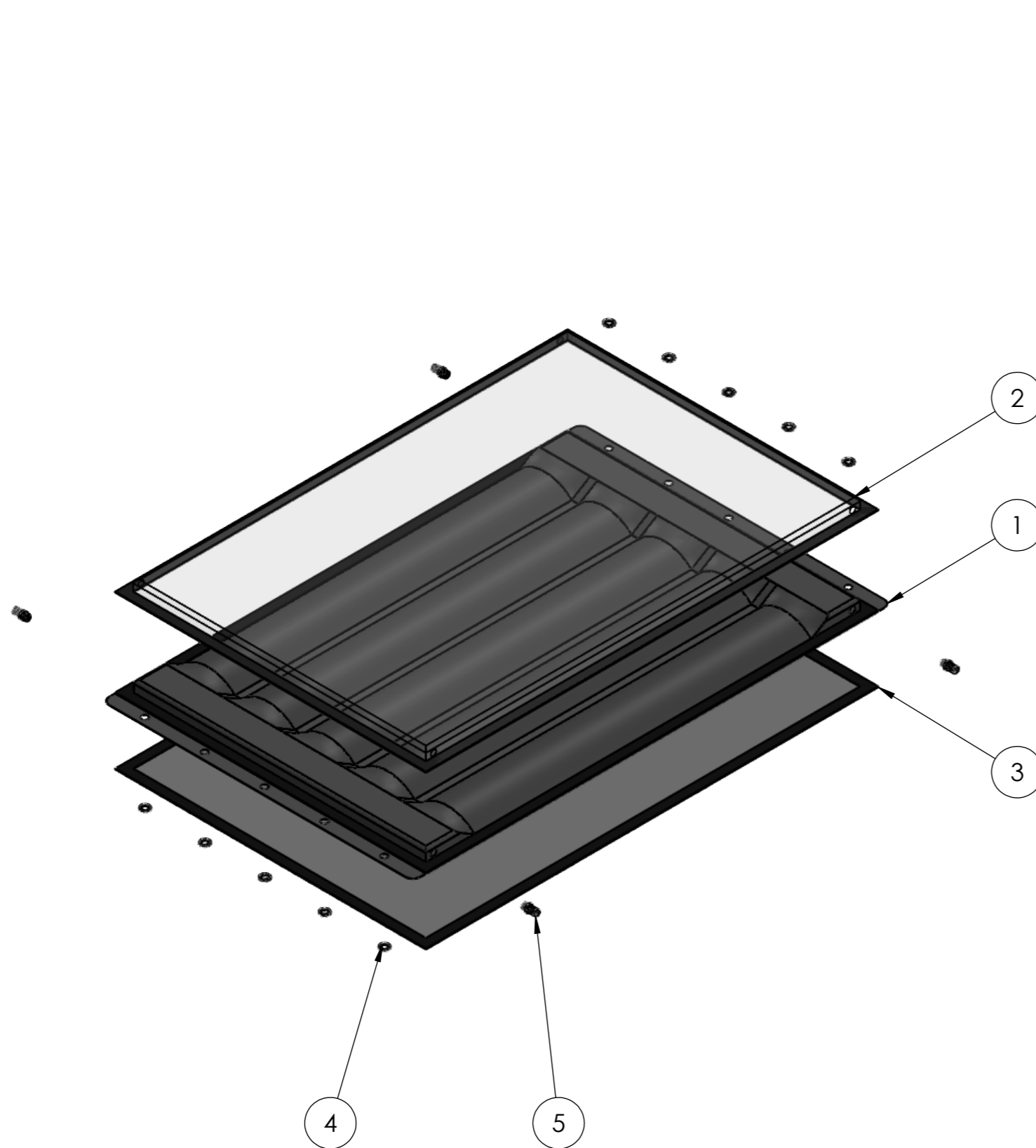
A partir do modelo desenvolvido por [5] algumas oportunidades de melhorias foram incorporadas ao projeto, que estão descritas na Seção 3.2. O coletor projetado é composto por três camadas principais: cobertura transparente, camada absorvedora e camada para isolamento. As suas dimensões externas são 1280 mm de comprimento e 832 mm de largura e é composto por cinco canais para circulação de água. O material selecionado para todas as partes foi o poliuretano. As três partes principais podem ser facilmente separadas para manutenção ou substituição, pois são unidas com velcro.

Entre os canais há um espaçamento de 20 mm destinado ao processo de vulcanização. A vulcanização também é realizada nas bordas da camada absorvedora para unir as camadas superior e inferior para formar os canais e fechar o sistema. A área tracejada da página 3 do desenho cotado do coletor demonstra o local a ser vulcanizado.

Quatro canhões de depósito roscado foram inseridos no interior da camada absorvedora, com diâmetro de 20 mm, que têm a função de conectar o coletor às tubagens do sistema, sendo dois para a entrada e dois para a saída de água. Assim, o coletor poderá ser conectado em série ou em paralelo com outros coletores. Caso o coletor seja utilizado individualmente, a entrada e a saída restantes poderão ser fechadas



com um tampão. Dez ilhós com 15 mm de diâmetro foram inseridos na camada absorvedora do coletor para fixá-lo na estrutura, sendo cinco na parte superior e cinco na parte inferior.

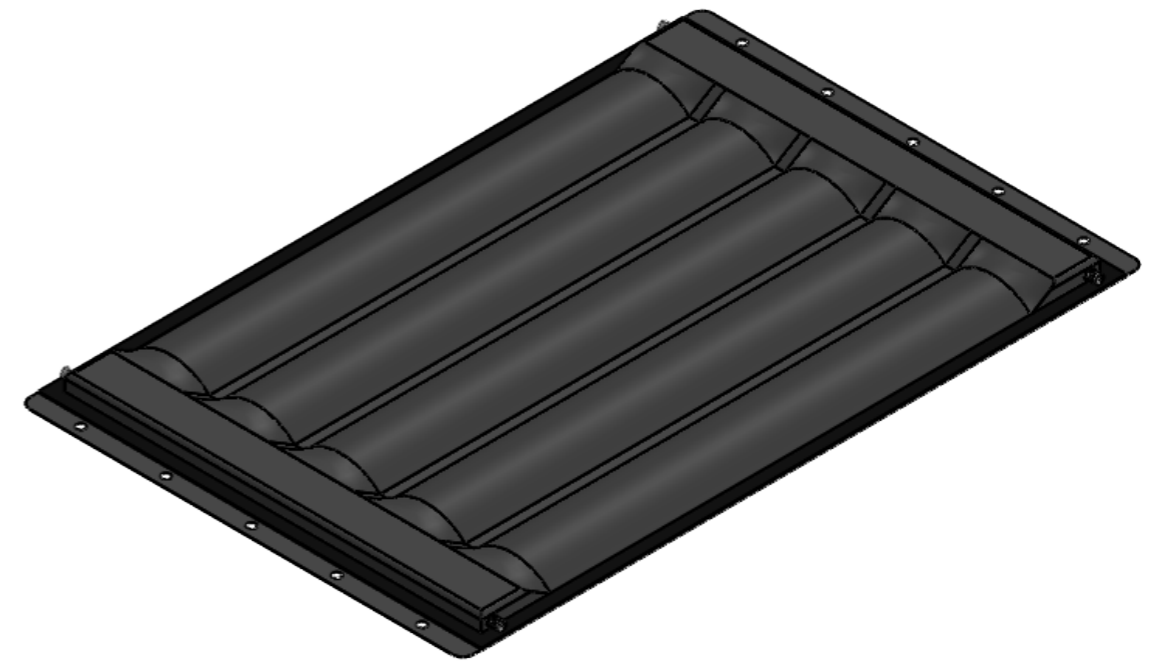
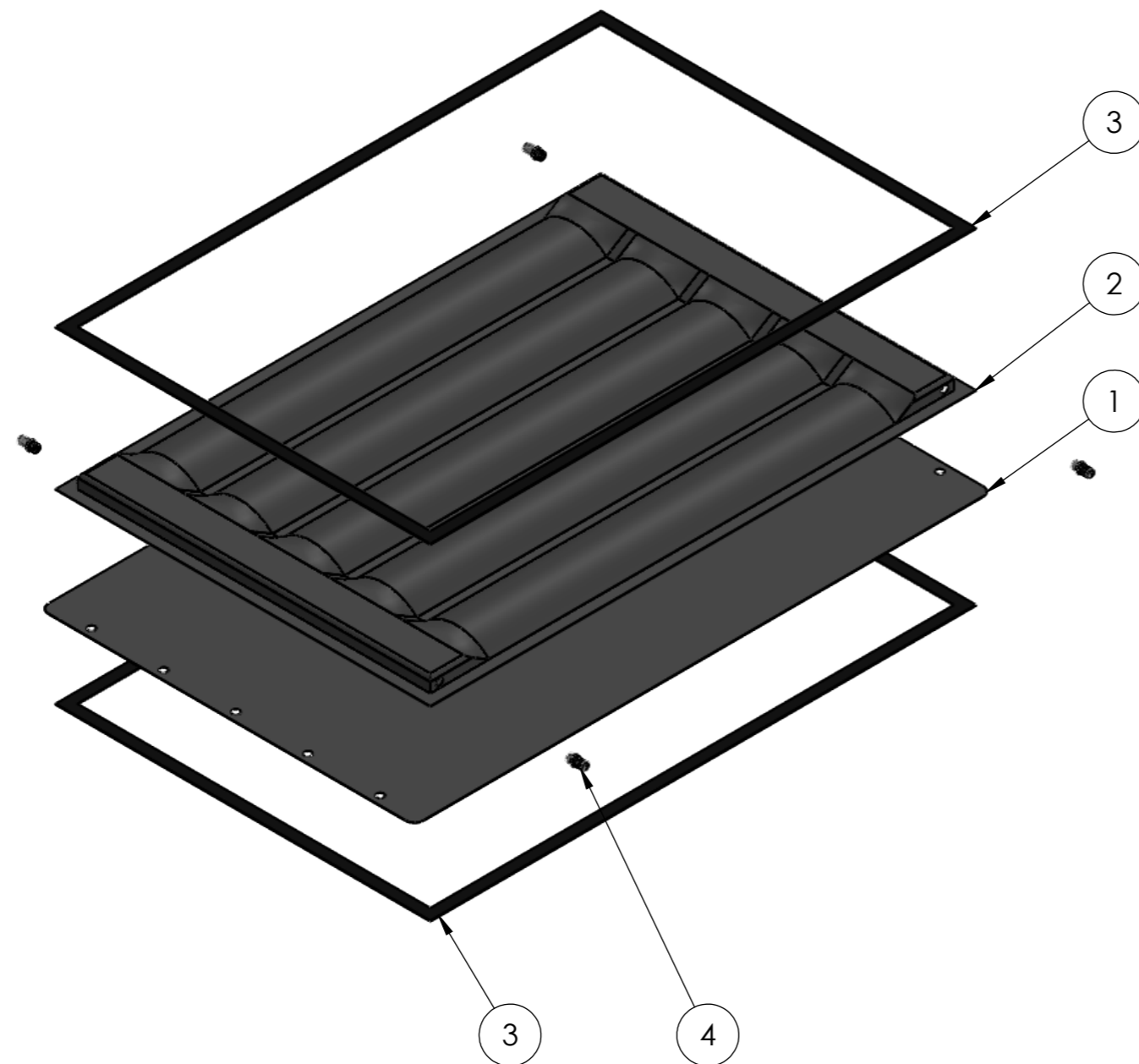
A vista explodida do coletor, o desenho cotado da camada absorvedora, da cobertura transparente e da camada para isolamento são apresentadas a seguir.



NOTAS:

- O coletor é fabricado em tecido de poliuretano preto. Portanto as geometrias representadas nos desenhos são esperados com o coletor cheio de água;
- Os chanfros feitos nos desenhos servem para dizer que o coletor não possui medidas retas, porém os valores mais importantes são as medidas do perímetro.

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CAMADA ABSORVEDORA	1
2	CAMADA TRANSPARENTE	1
3	CAMADA PARA ISOLAMENTO	1
4	ILHÓS - DIAM. INT. 15mm	10
5	CANHÃO DEPÓSITO ROSCADO 1/2pol (DIAM. INT.)	4
	Descrição do Componente: COLETOR COMPLETO	Folha: 1/5 Unidade: mm
	Projeto: COLETOR SOLAR FLEXÍVEL	Escala: 1:10 Peso (Kg): --
Data: 06/01/2020	Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	 Verificação: OK



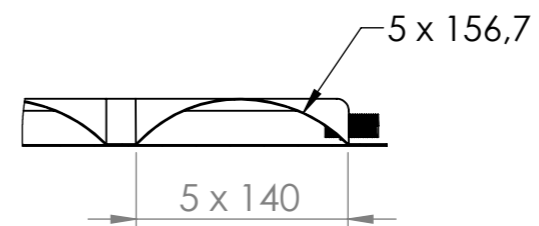
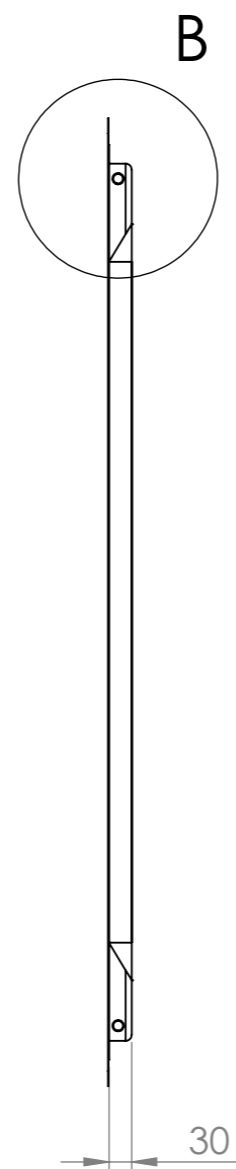
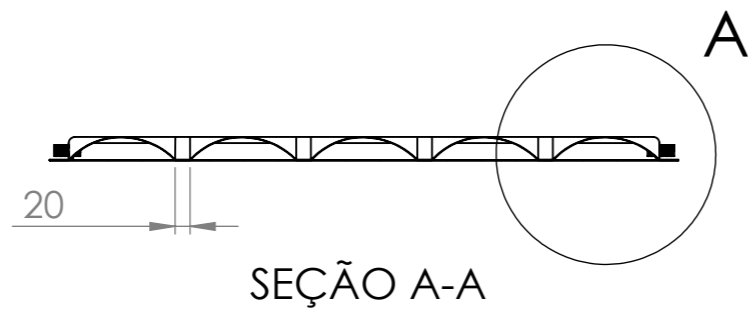
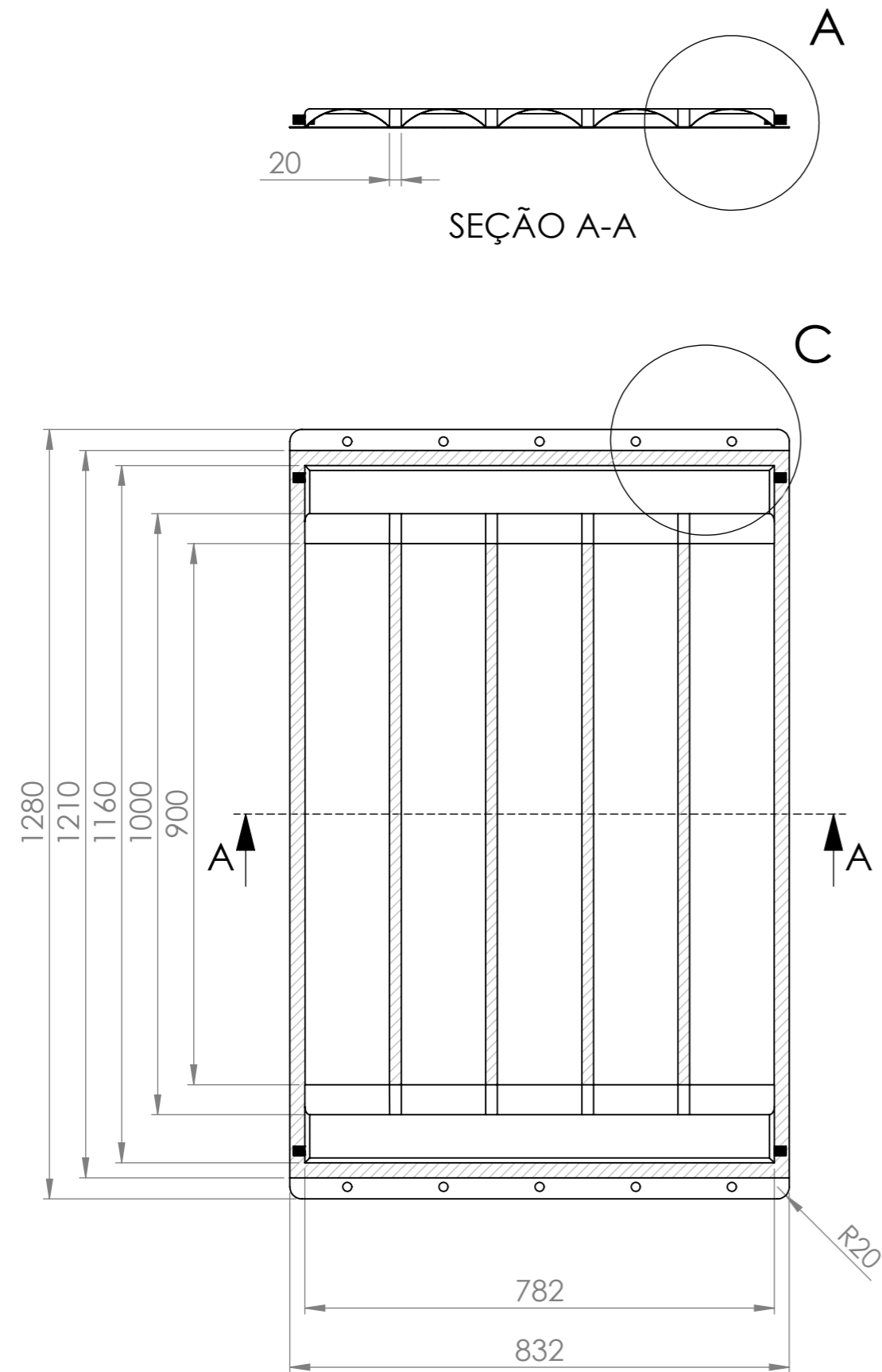
INSTRUÇÕES:

- O velcro é costurado por todo o perímetro da camada absorvedora;
- O velcro da parte de cima tem as mesmas dimensões que da parte de baixo.

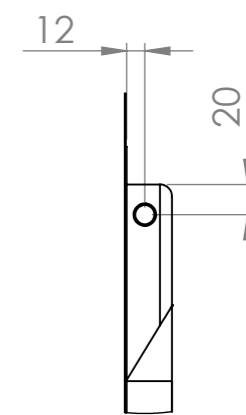
NOTAS:

- A geometria da parte superior da camada absorvedora está representada no desenho como se estivesse cheio de água.

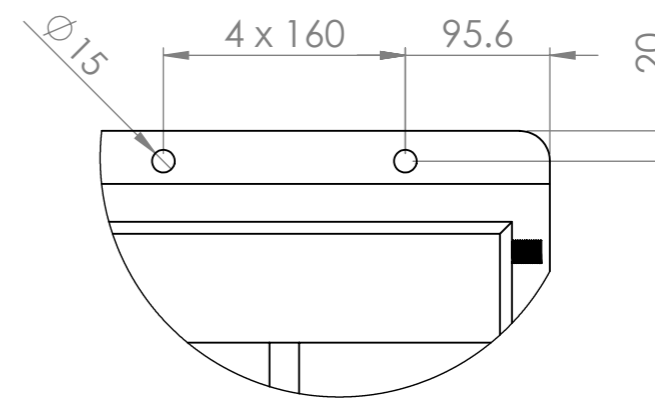
Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CAMADA ABSORVEDORA (PARTE INFERIOR)	1
2	CAMADA ABSORVEDORA (PARTE SUPERIOR)	1
3	VELCRO - LARGURA 25mm	-
4	CANHÃO DEPÓSITO ROSCADO 1/2pol (DIAM. INT.)	4
	Descrição do Componente: CAMADA ABSORVEDORA	Folha: 2/5 Unidade: mm
	Projeto: COLETOR SOLAR FLEXÍVEL	Escala: 1:10 Peso (Kg): --
Data: 06/01/2020	Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	 Verificação: OK



DETALHE A
ESCALA 1 : 5



DETALHE B
ESCALA 1 : 5

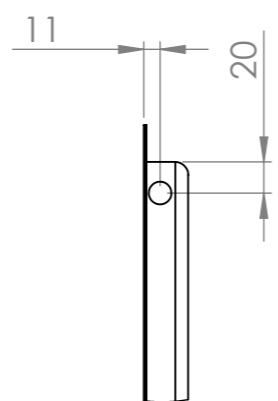


DETALHE C
ESCALA 1 : 5

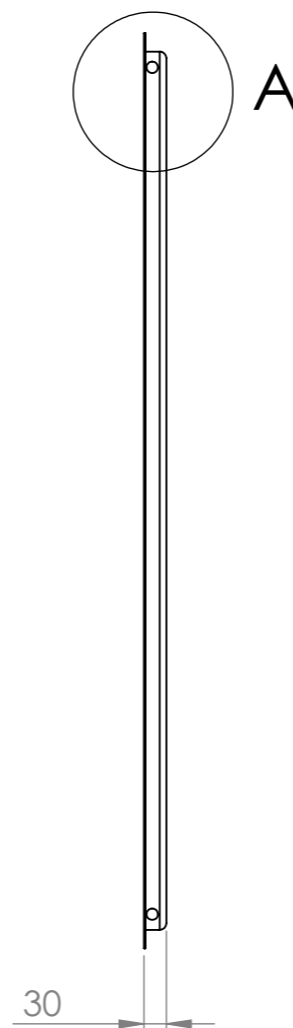
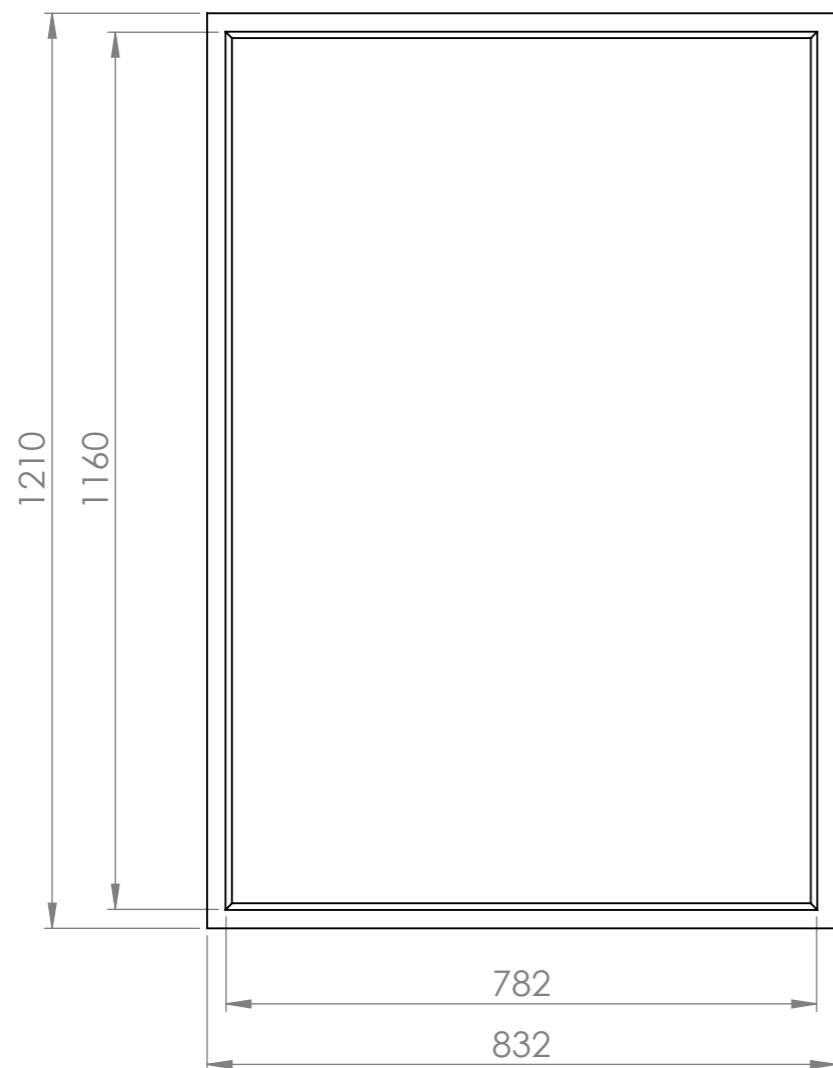
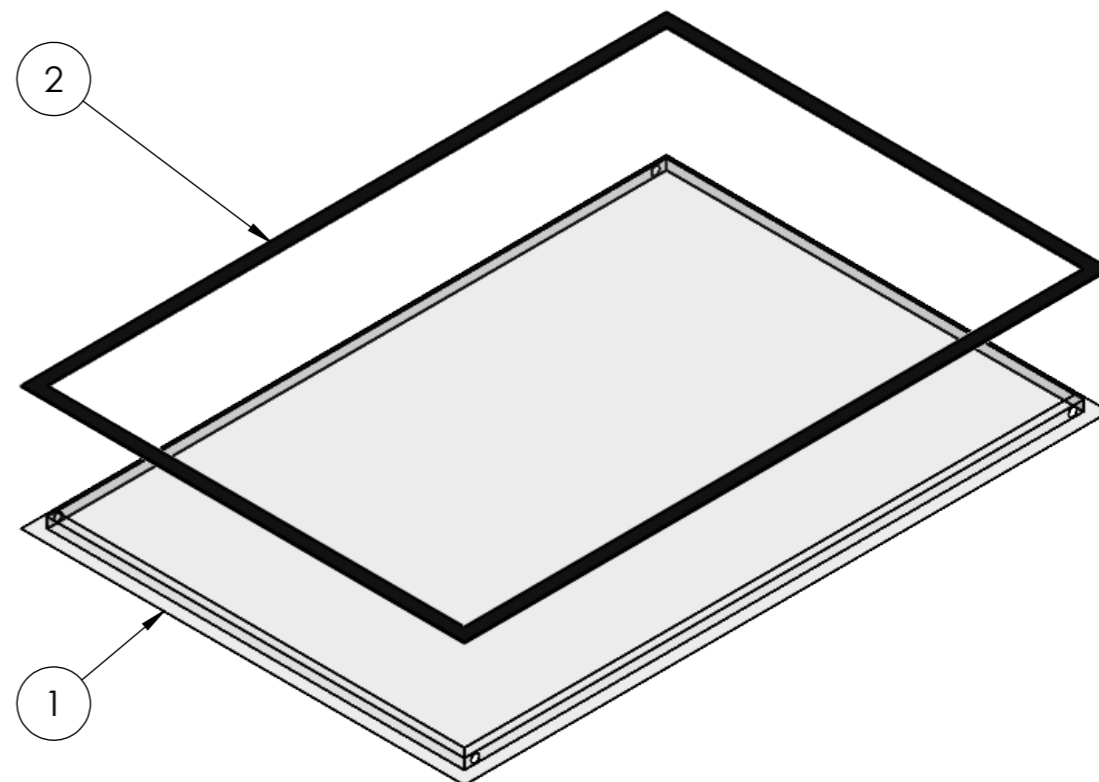
INSTRUÇÕES:

- Vulcanização na área hachurada para unir as camadas superior e inferior de PU para formar os canais e fechar o sistema.

	Descrição do Componente:	CAMADA ABSORVEDORA	Folha: 3/5
	Projeto:	COLETOR SOLAR FLEXÍVEL	Unidade: mm
Data:	Projetado por:	Cleber Pizzatto Dallegrave	Escala: 1:10
06/01/2020	Revisado por:	Luis Frólén Ribeiro	Peso (Kg): --
			Verificação: OK



DETALHE A
ESCALA 1 : 5



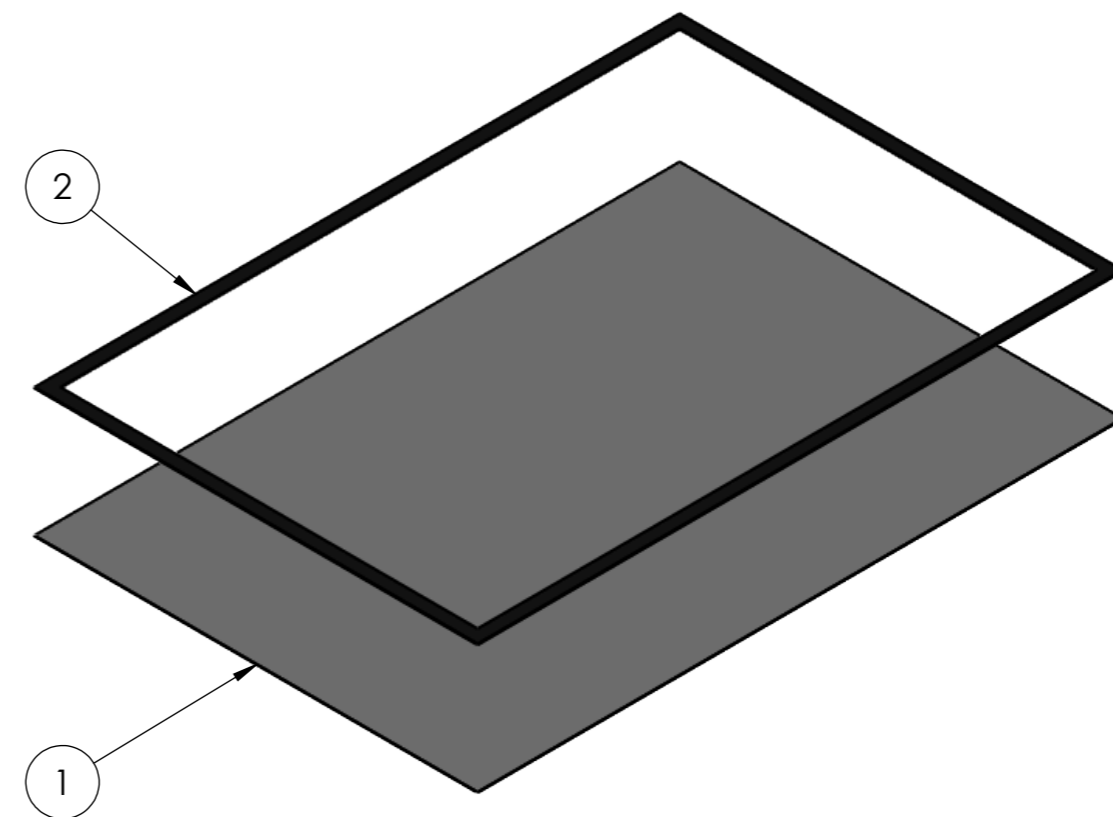
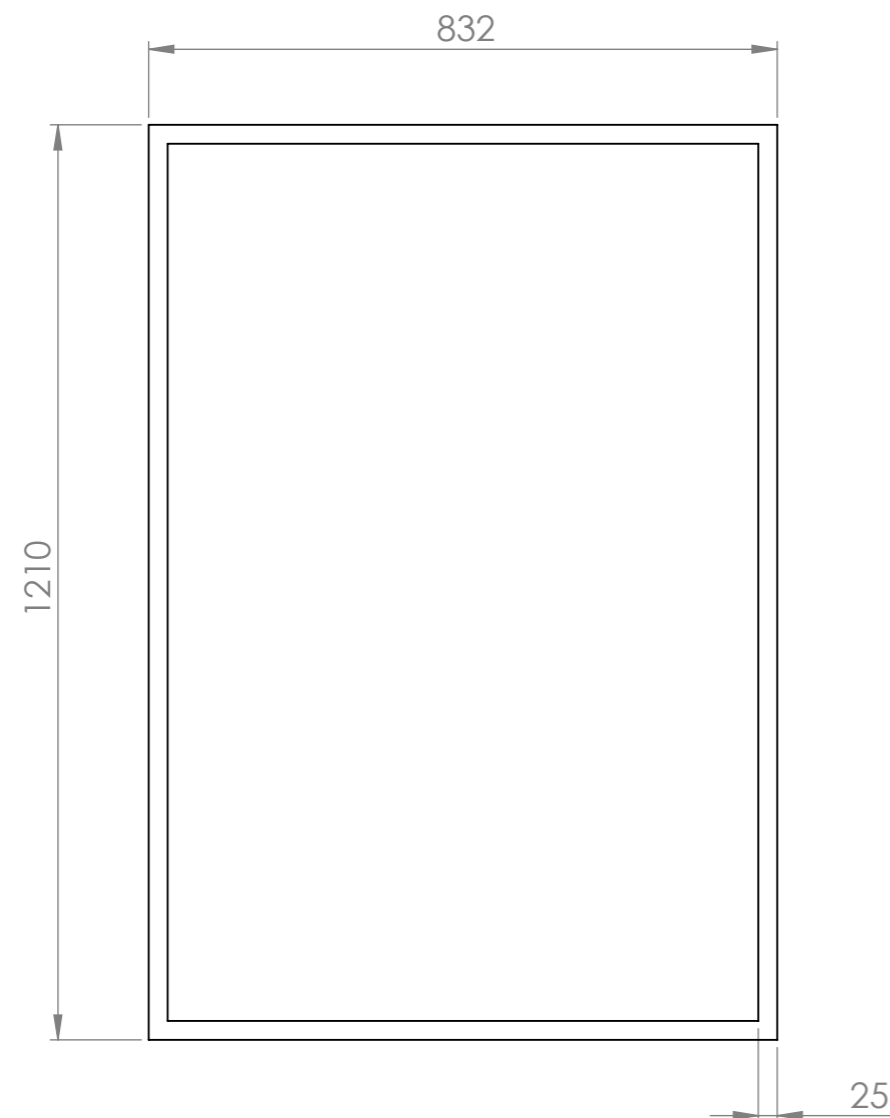
INSTRUÇÕES:

- O velcro é costurado por todo o perímetro da camada.

NOTAS:

- Os chanfros feitos nos desenhos servem para dizer que a cobertura não possui medidas retas, porém os valores mais importantes são as medidas do perímetro;
- A camada deve ser produzida de modo que tenha um encaixe justo com a camada dos canais.

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CAMADA TRANSPARENTE (PU TRANSPARENTE)	1
2	VELCRO - LARGURA 25mm	-
	Descrição do Componente: CAMADA TRANSPARENTE	Folha: 4/5 Unidade: mm
	Projeto: COLETOR SOLAR FLEXÍVEL	Escala: 1:10 Peso (Kg): --
Data: 06/01/2020	Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	 Verificação: OK



INSTRUÇÕES:

- Corte de tecido PU preto nas medidas especificadas para a camada para isolamento;
- O velcro é costurado por todo o perímetro do tecido PU.

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CAMADA PARA ISOLAMENTO (TECIDO PU)	1
2	VELCRO - LARGURA 25mm	-
	Descrição do Componente: CAMADA PARA ISOLAMENTO	Folha: 5/5 Unidade: mm
	Projeto: COLETOR SOLAR FLEXÍVEL	Escala: 1:10 Peso (Kg): --
Data: 06/01/2020	Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	 Verificação: OK

4.2. Bancada

Projetou-se uma bancada metálica composta por uma estrutura para o coletor solar e uma estrutura para o reservatório térmico para montar o sistema de aquecimento solar de água para os testes.

Para verificar a resistência mecânica da bancada através de simulações feitas no software Ansys Workbench no ambiente *Static Structural*, determinou-se as forças de arrasto e peso atuantes na bancada.

4.2.1. Estrutura para o coletor

Como a estrutura para o coletor foi projetada para suportar dois coletores, calculou-se a força exercida pelo peso de dois coletores cheios de água e a força de arrasto nas superfícies dos coletores.

Tendo em vista que a capacidade do coletor é de 18 litros ou $0,018 \text{ m}^3$, a densidade da água a temperatura de 20°C é de $998,20 \text{ kg/m}^3$, chega-se, através da Equação (3.1), ao valor da massa de água contida no coletor de 17,96 kg.

O valor da força peso calculado, adoptando a gravidade como $9,81 \text{ m/s}^2$, foi de 176,20 N.

Para determinar a força de arrasto exercida pelo vento na estrutura, considerou-se a condição extrema de tempestade em que a velocidade do vento estivesse a 100 km/h e incidindo no coletor inclinado $51,48^\circ$ com a horizontal. A área frontal do coletor é $1,06 \text{ m}^2$ (1280 mm x 832 mm). O coeficiente de arrasto adoptado foi de 1,20 e a densidade do ar de $1,23 \text{ kg/m}^3$. Sendo assim, da Equação (3.3), chega-se à força de arrasto de 600 N.

Portanto, a força total resultante num coletor é de 776,20 N. Como a estrutura pode comportar dois coletores, a força total exercida é de 1552,40 N.

A Figura 4.1 mostra o deslocamento total da estrutura. O deslocamento máximo se localizou no centro da barra superior do quadro da estrutura, cujo valor foi de 6,83 mm. A Figura 4.2 demonstra a distribuição da tensão equivalente que atingiu o valor máximo de $1,88\text{E}+08$ Pa na barra transversal do quadro da estrutura. As figuras estão em alta escala para enfatizar o efeito das condições impostas na estrutura.

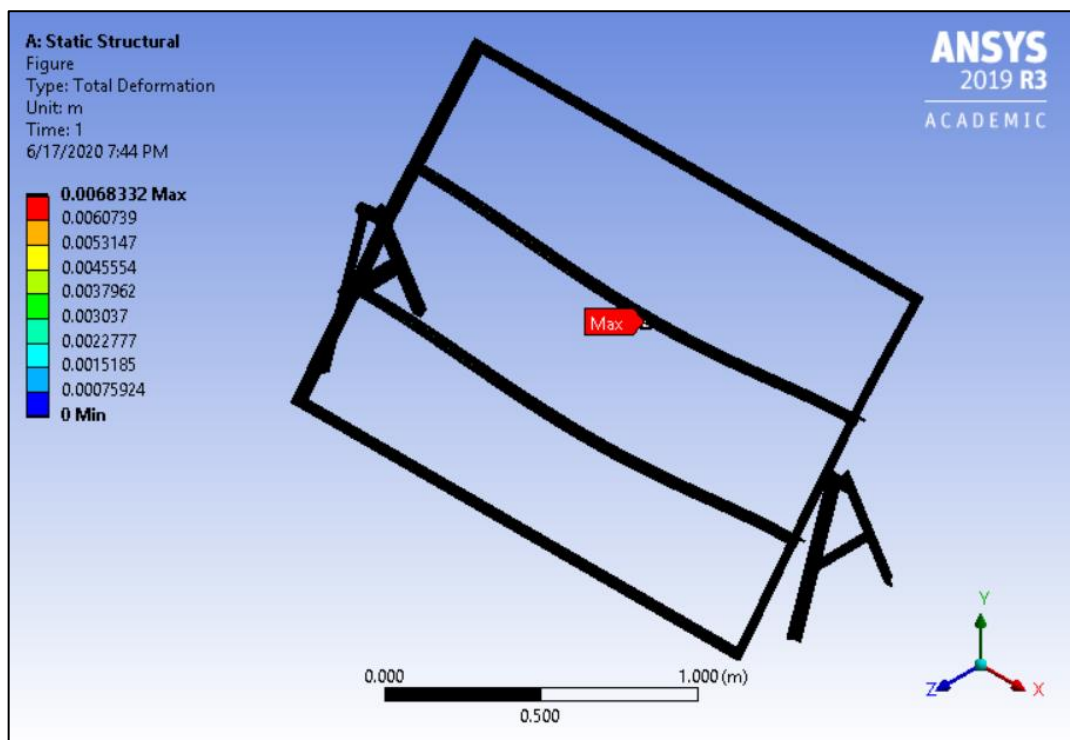


Figura 4.1 – Deslocamento total da estrutura para o coletor.

A tensão de cedência que o material suporta é $2,5\text{E}+08$ Pa e o maior valor obtido pela simulação (tensão equivalente von-Mises) foi $1,88\text{E}+08$ Pa, ou seja, a estrutura não terá deformação plástica seja por tração ou compressão.

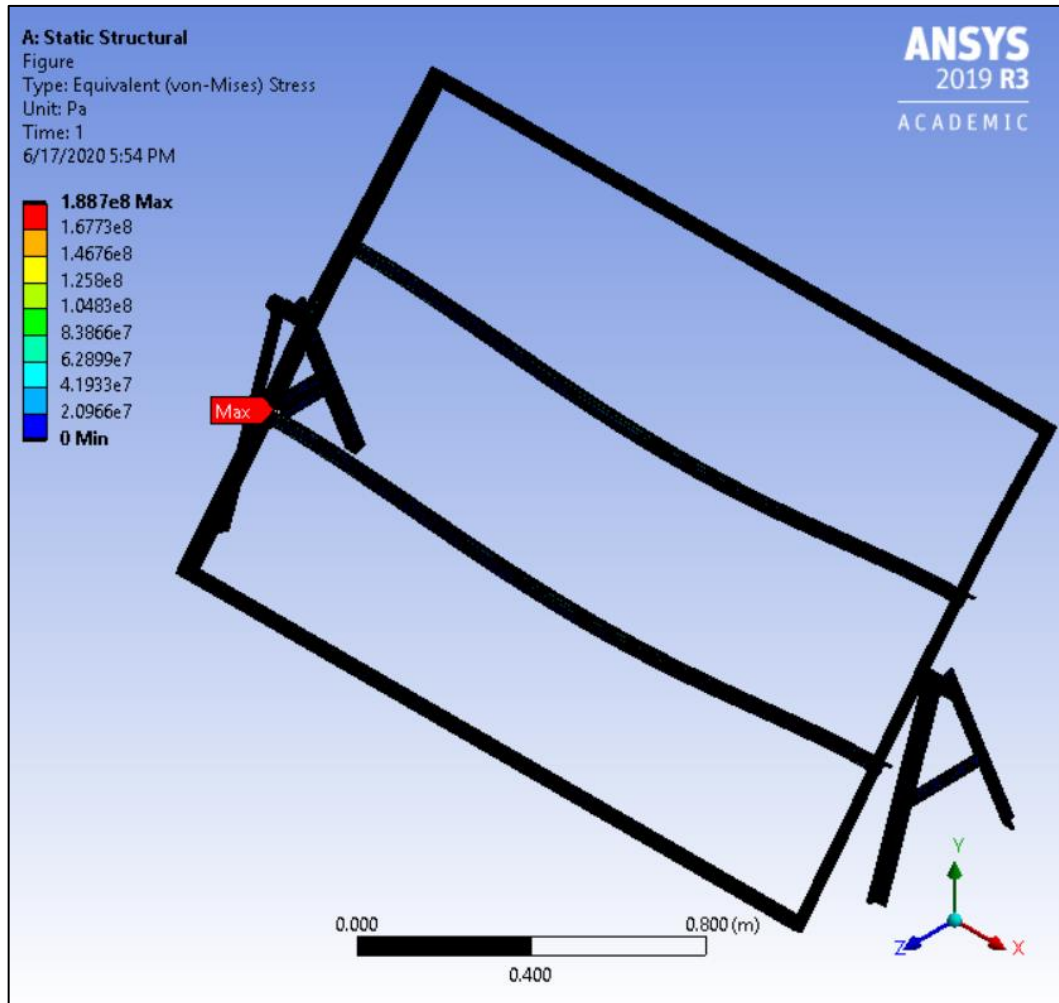


Figura 4.2 – Tensão equivalente (von-Mises) na estrutura para o coletor.

4.2.2. Estrutura para o reservatório térmico

A análise da estrutura para o reservatório térmico levou em consideração apenas a força peso resultante do conjunto de elementos que constituem o reservatório térmico cheio de água.

Fez-se, então, o levantamento da massa de cada componente. O depósito de 230 litros possui massa de 9,25 kg e o depósito de 125 litros tem massa de 7 kg. A densidade da lã de rocha, a 20°C, é de 64 kg/m³. Considerando que foi usado 2 m² do material, correspondente a área lateral do depósito cilíndrico de 230 litros, com

espessura de 38 mm, a massa é de 4,86 kg. O volume de água do reservatório térmico é de 125 litros, ou seja, $0,12 \text{ m}^3$. A densidade da água a 20°C é $998,20 \text{ kg/m}^3$, assim, a massa da água no reservatório é 119,80 kg. Os dados das massas dos componentes estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Relação da massa de cada componente da estrutura do reservatório.

Componente	Massa [kg]
Depósito 230 L	9,25
Depósito 125 L	7,00
Lã de rocha	4,86
Água	119,80
Total	140,91

Portanto, a massa total situada na estrutura é 140,91 kg, o que resulta na força peso de 1382,33N, admitindo a gravidade como $9,81 \text{ m/s}^2$.

O valor das forças atuantes em cada estrutura da bancada está apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Forças atuantes nas estruturas.

Estrutura	Forças	Valor [N]	Total [N]
Coletor	Peso	176,20	776,20
	Arrasto	600,00	
Reservatório	Peso	1382,33	1382,33

O valor da tensão equivalente máxima na estrutura para o reservatório foi de $9,24\text{E}+07 \text{ Pa}$ localizado na união do quadro com os pés da estrutura, conforme Figura 4.3. O deslocamento total máximo foi de 0,73 mm no centro do quadro da estrutura, Figura 4.4.

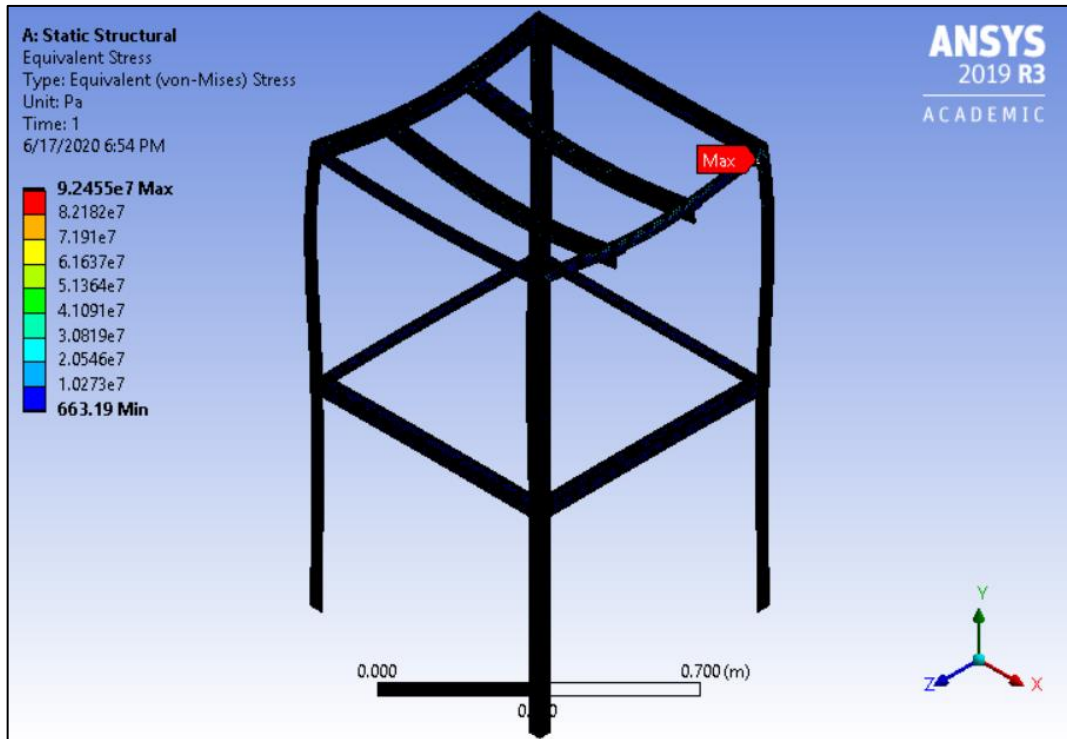


Figura 4.3 – Tensão equivalente na estrutura para o reservatório.

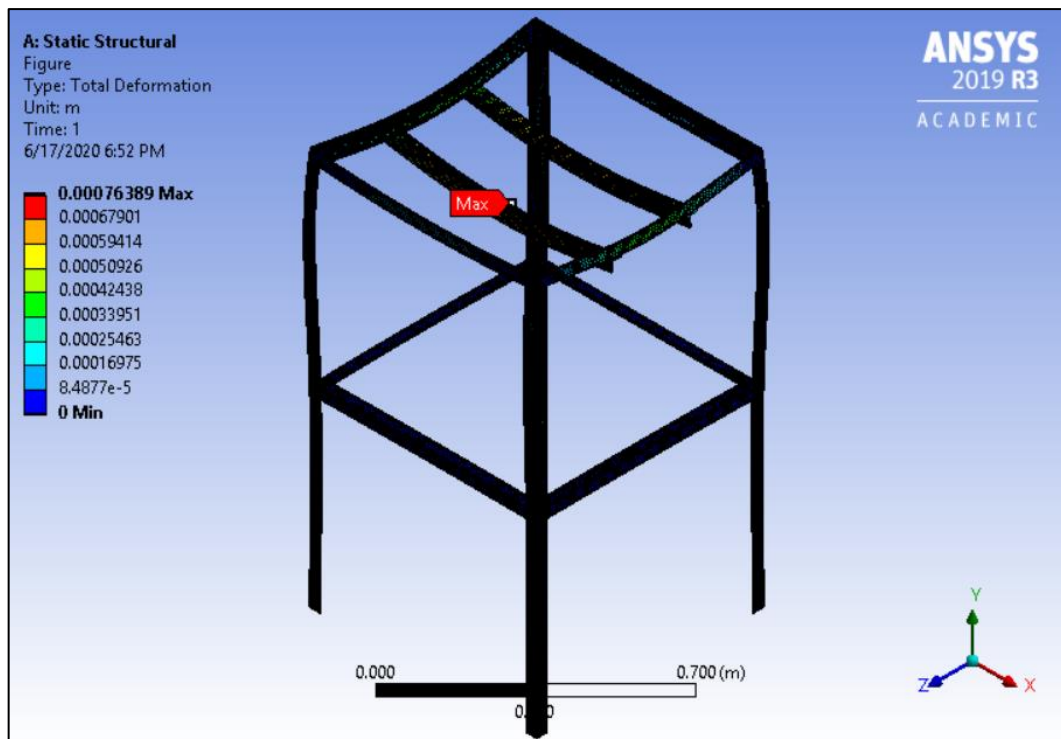
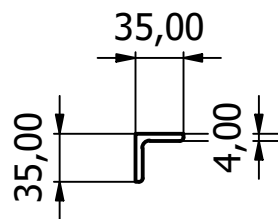
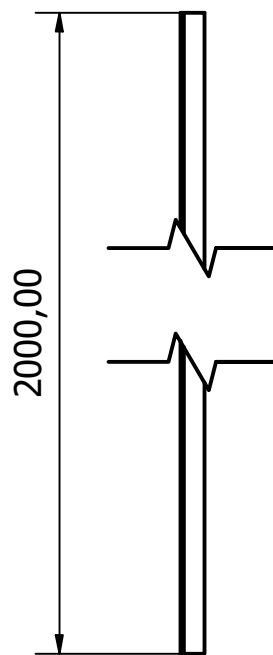


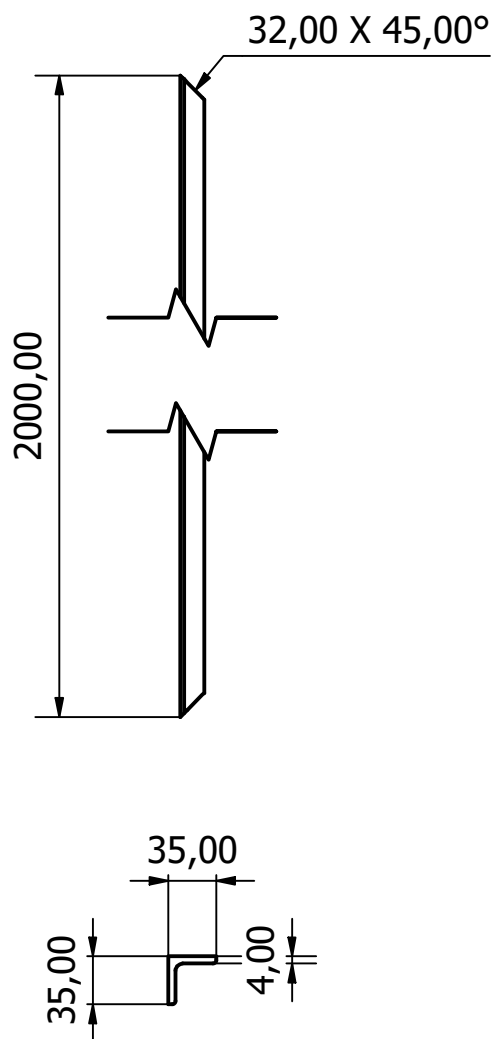
Figura 4.4 – Deslocamento total da estrutura para o reservatório.

A tensão equivalente máxima obtida em ambas as análises estruturais situou-se com valores abaixo do valor crítico da tensão de cedência, comprovando que não ocorre deformação plástica. A diferença entre a tensão obtida na estrutura para o coletor e na estrutura para o reservatório e a tensão máxima foram, respectivamente, de $6,2E+07$ Pa e $1,58E+08$ Pa, demonstrando que o requisito de segurança para resistência estrutural foi atendido.

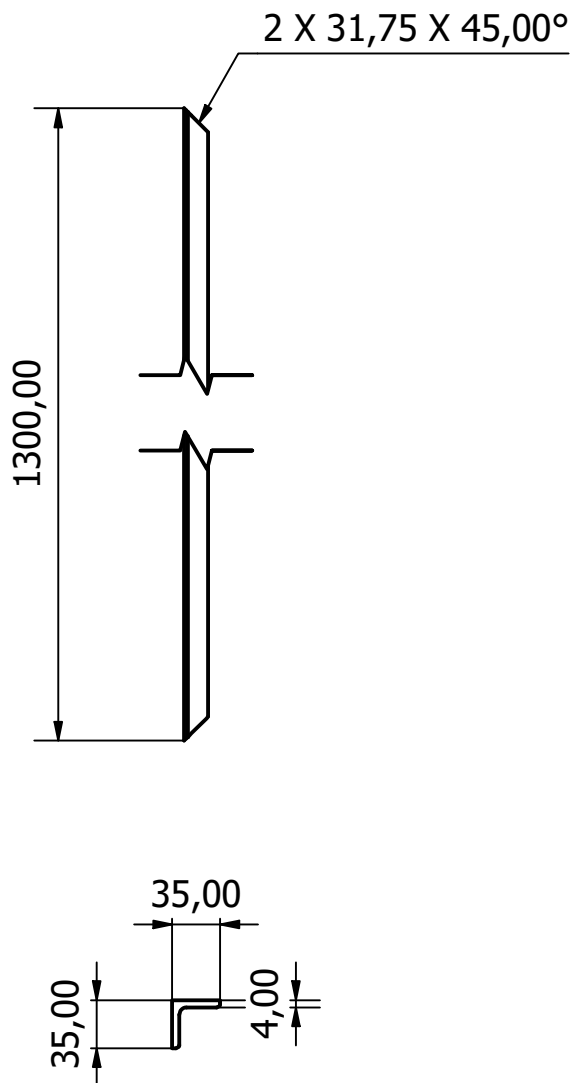
Os desenhos cotados dos processos de fabricação e de montagem da bancada são mostrados a seguir.



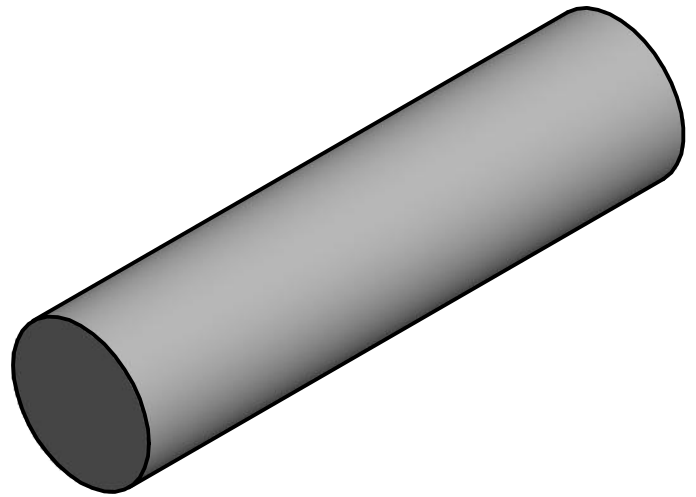
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Barra transversal do quadro	Diedro: 
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 11/1/2019	 ipb INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 0.1:1
		Folha: 1/5



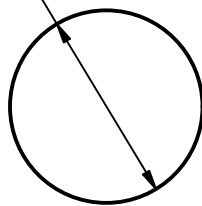
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Barra externa do quadro	Diedro:
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 1/20/2019	INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 0.1:1
		Folha: 2/5



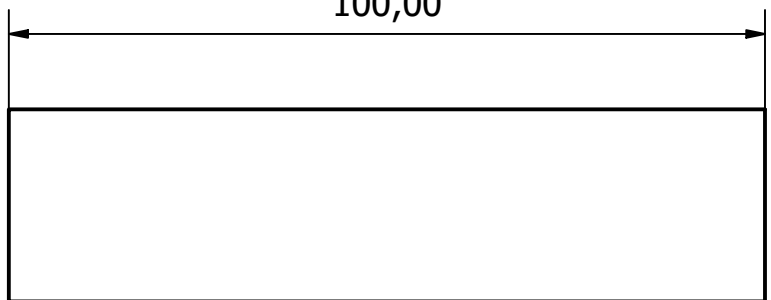
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Barra externa lateral do quadro	Diedro:
Revisado por: Luis Frölen Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 11/1/2019	INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 0.1 : 1
		Folha: 3/5

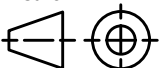



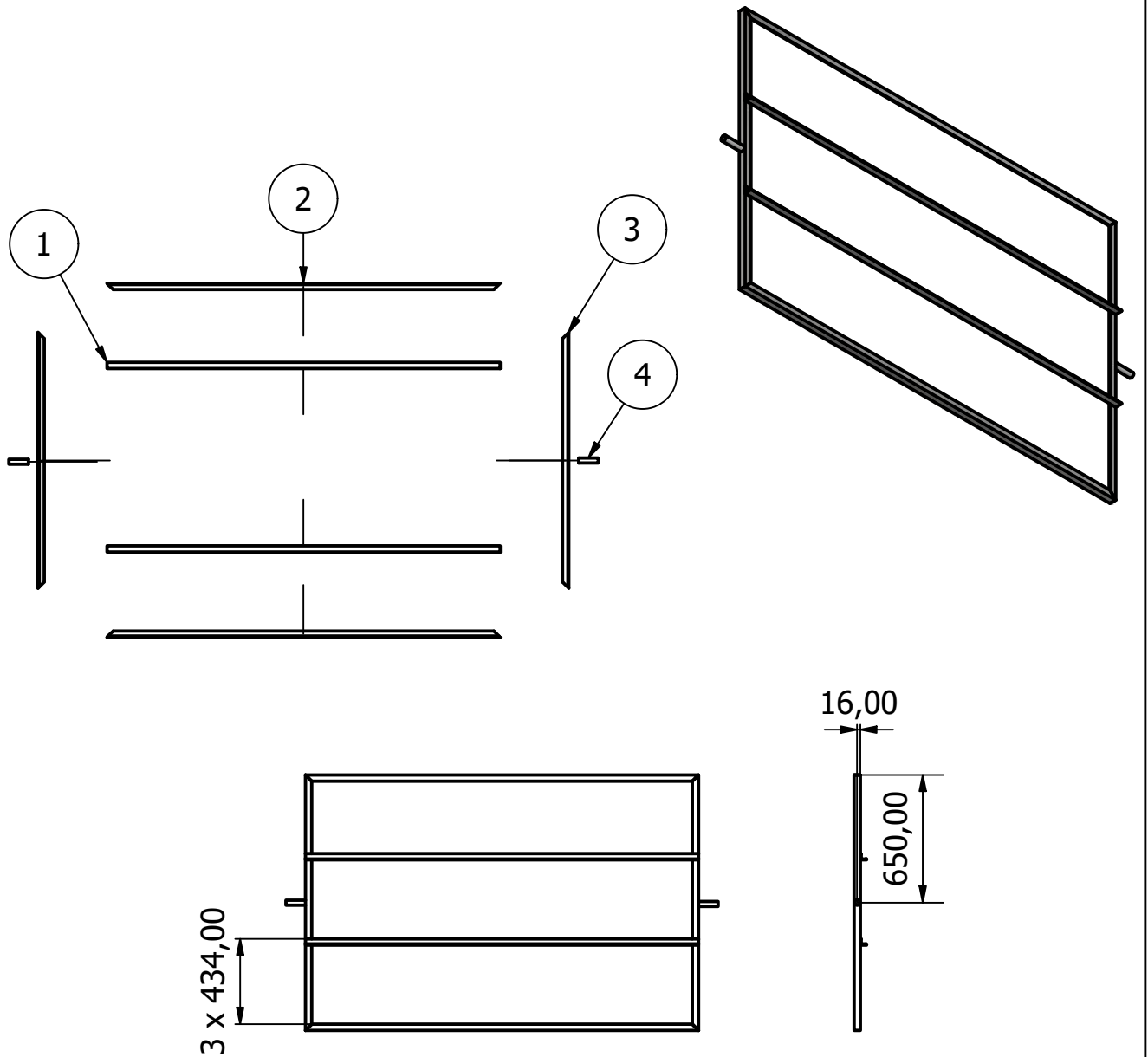
Ø25,40



100,00



Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Cilindro interno	Diedro: 
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 6/17/2020	 INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 1 : 1
		Folha: 4/5

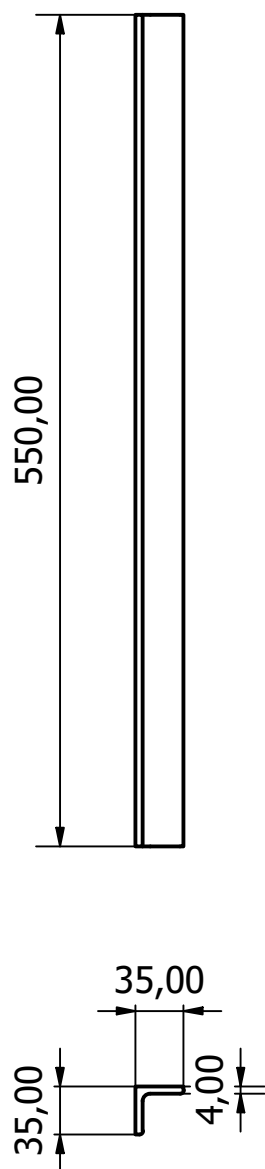


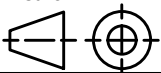

Nota:

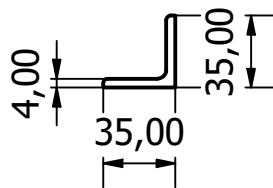
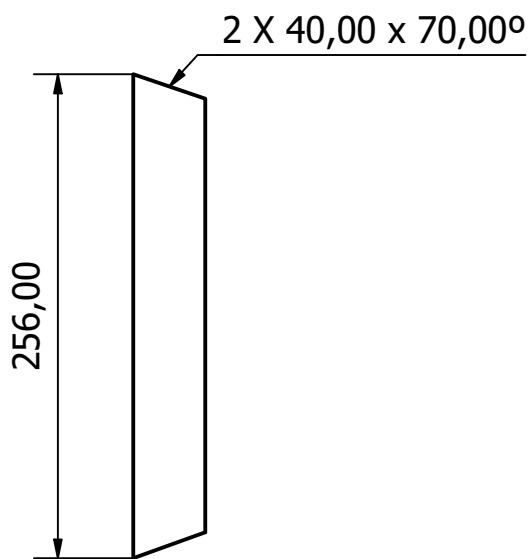
- Todas as partes são unidas através de solda.

LISTA DE PEÇAS

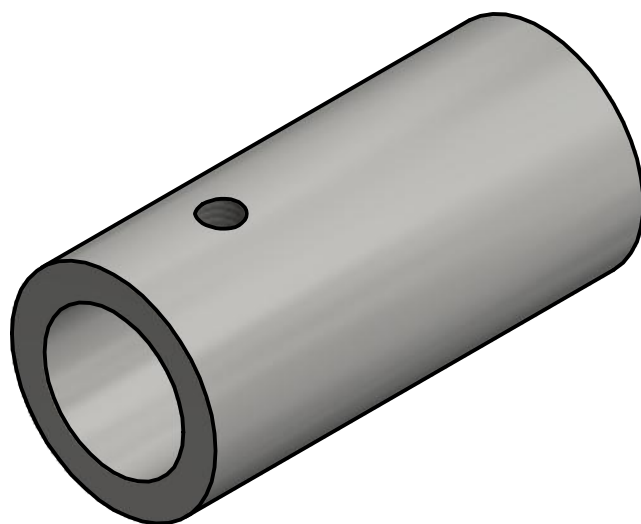
ITEM	QTD	DESCRIÇÃO	
1	2	Barra transversal do quadro	
2	2	Barra externa do quadro (maior)	
3	2	Barra externa do quadro (menor)	
4	2	Tubo interno	
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave		Descrição do componente: Quadro da estrutura para o coletor	Diedro:
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro		Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 11/1/2019	Massa: 23.44 kg	IPB INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 0.03 : 1
			Folha: 5/5



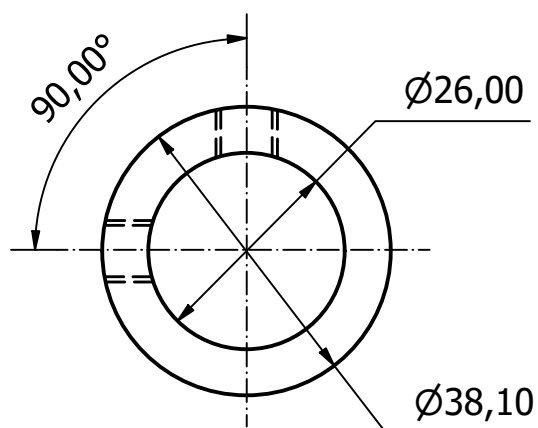
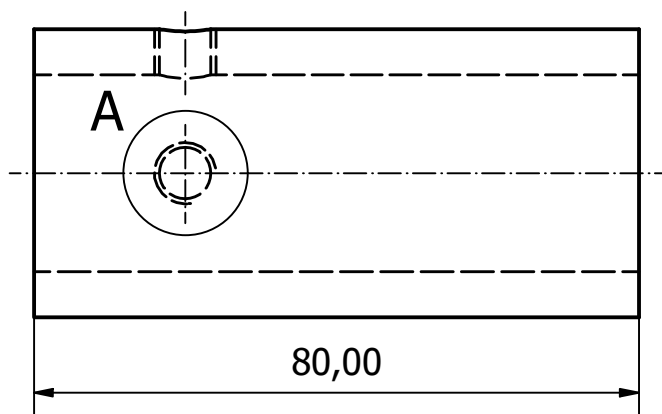
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Pé do A	Diedro: 
Revisado por: Luis Frölen Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 11/1/2019	 INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 0.2 : 1
		Folha: 1/4



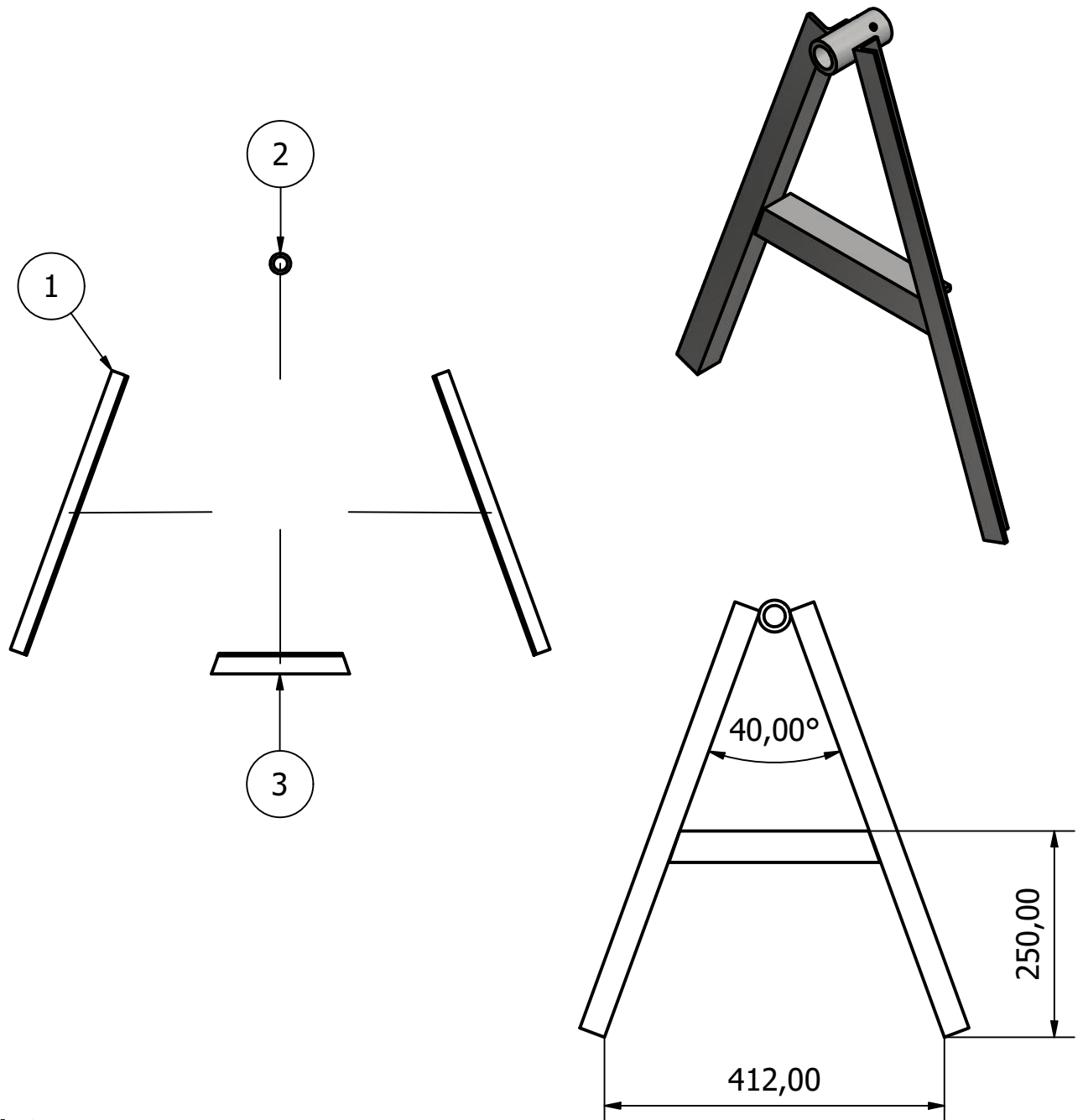
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Barra transversal do A	Diedro: 
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 11/22/2019	 INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 1 : 4
		Folha: 2/4



A (1 : 1)



Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Tube externo	Diedro:
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 10/13/2019	INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 1 : 1
		Folha: 3/4



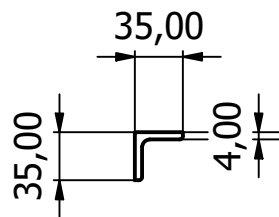
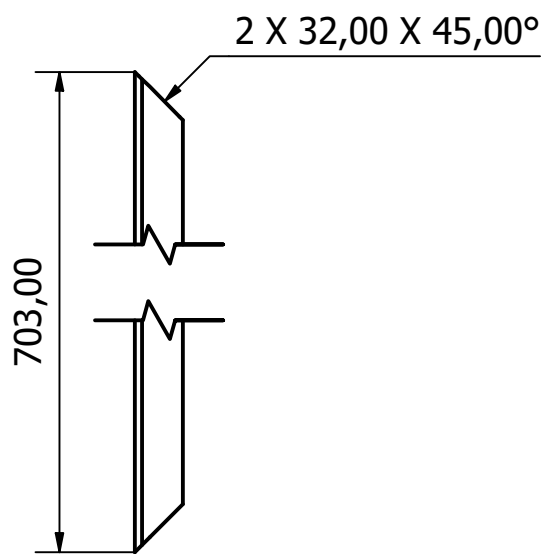
Nota:

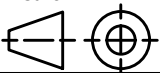

- Todas as partes são unidas através de solda.

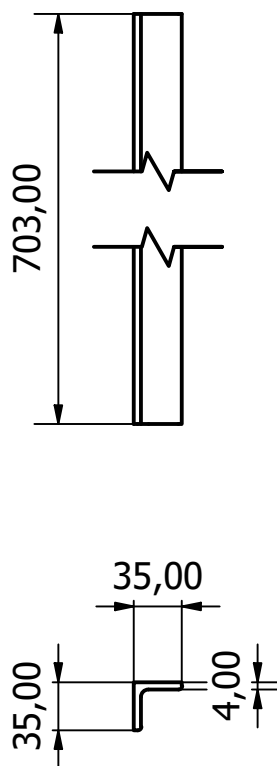
LISTA DE PEÇAS

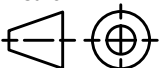

ITEM	QTD	DESCRIÇÃO
1	2	Pé do A
2	1	Tubo externo
3	1	Barra transversal do A

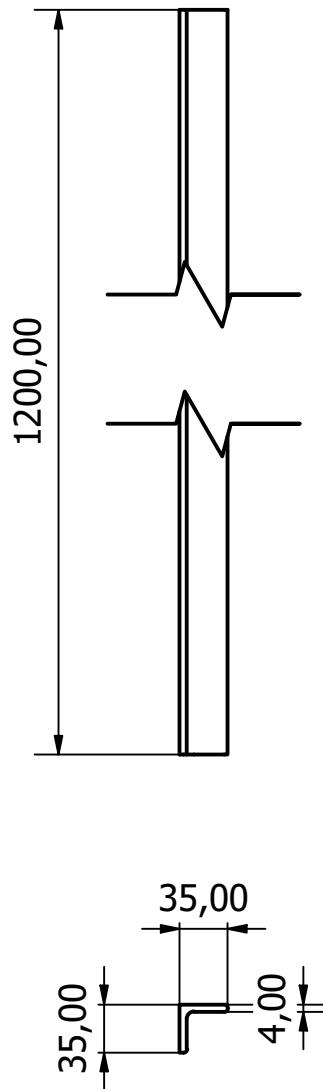
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave		Descrição do componente: Apoio em A		Diedro:
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro		Projeto: Coletor solar flexível		Unidade: mm
Data: 11/22/2019	Massa: 3.46 kg	IPB INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão		Escala: 0.13 : 1
				Folha: 4/4





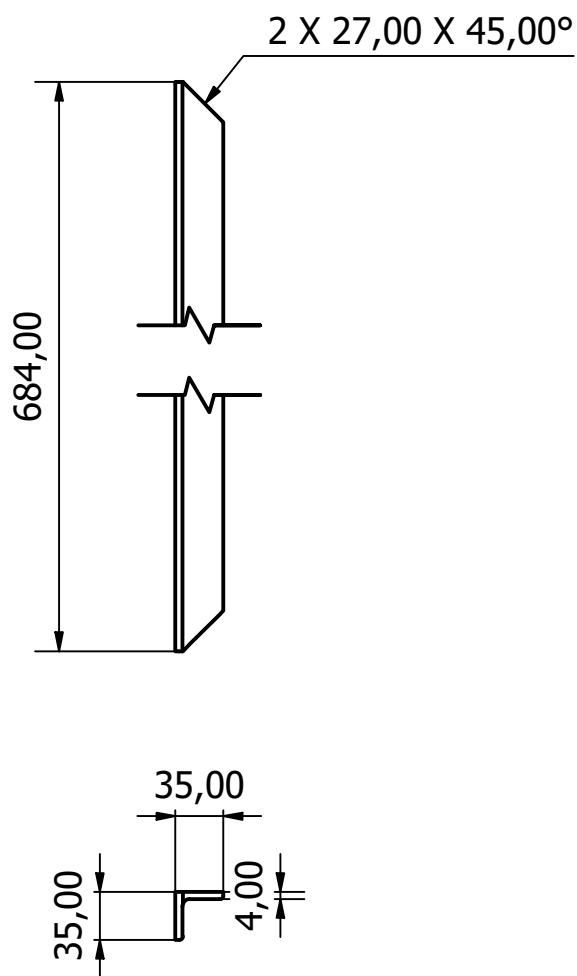
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Barra do quadro da estrutura do reservatório	Diedro: 
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 1/20/2019		Escala: 0.2 : 1
		Folha: 1/5

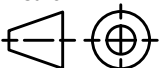



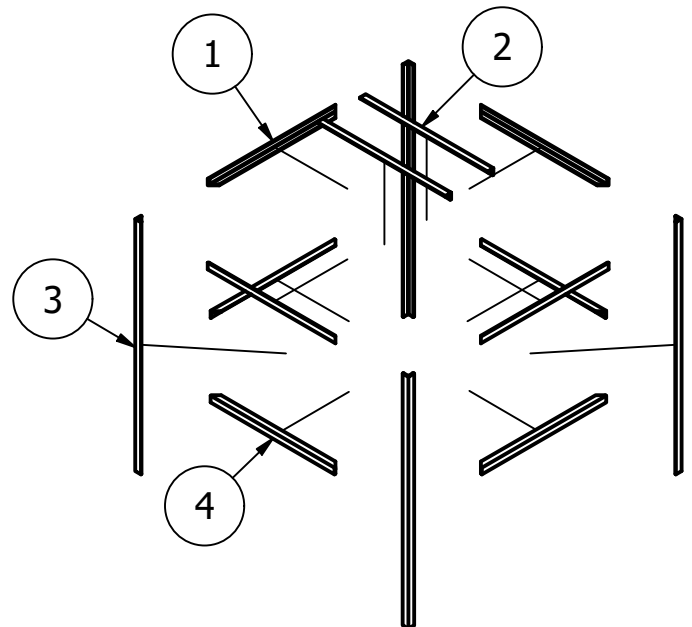
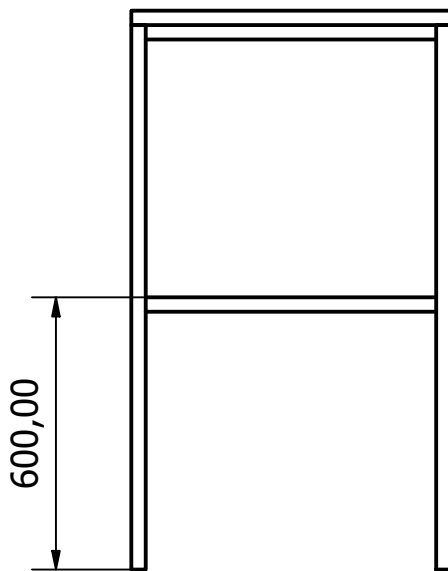
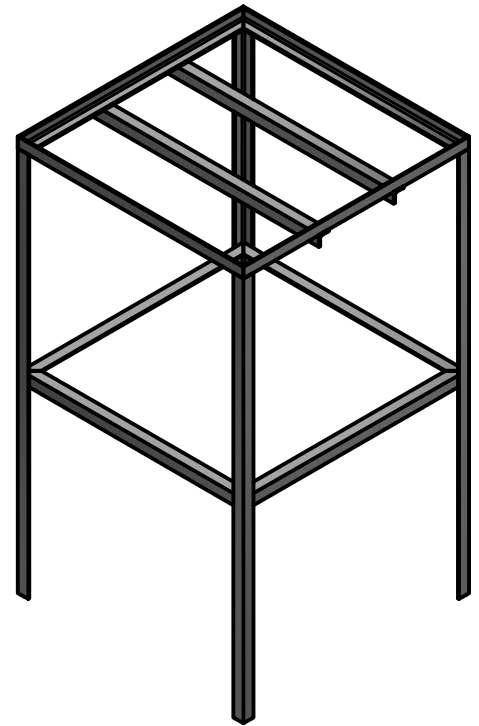
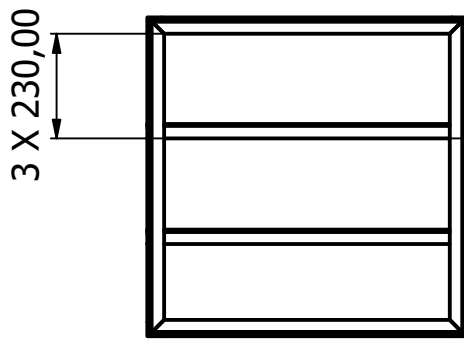
Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Barra transversal do quadro da estrutura do reservatório	Diedro: 
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 1/20/2019	 INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 0.2 : 1 Folha: 2/5



Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Pé da estrutura do reservatório	Diedro: 
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 11/1/2019	 INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 0.2 : 1
		Folha: 3/5



Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave	Descrição do componente: Reforço da estrutura do reservatório	Diedro: 
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro	Projeto: Coletor solar flexível	Unidade: mm
Data: 11/1/2019		Escala: 0.2 : 1
		Folha: 4/5



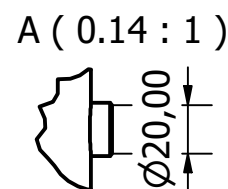
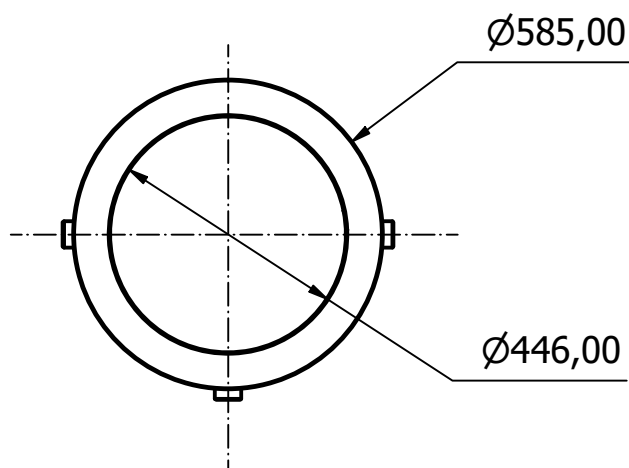
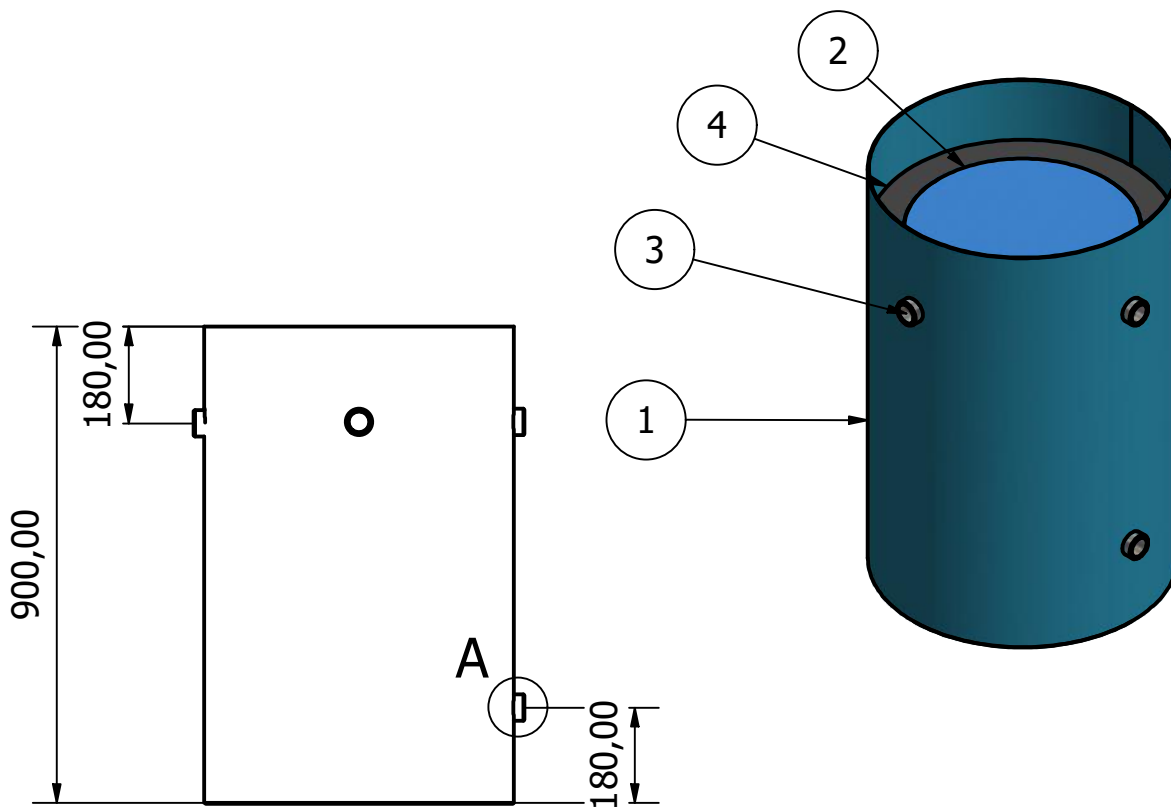
Nota:

- Todas as partes são unidas através de solda.

LISTA DE PEÇAS

ITEM	QTD	DESCRIÇÃO
1	4	Barra do quadro da estrutura do reservatório
2	2	Barra transversal da estrutura do reservatório
3	4	Pé da estrutura do reservatório
4	4	Reforço da estrutura do reservatório

Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave		Descrição do componente: Estrutura para o reservatório		Diedro:
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro		Projeto: Coletor solar flexível		
Data: 10/10/2019	Massa: 25.791 kg	INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão		Escala: 0.06 : 1
				Folha: 5/5



LISTA DE PEÇAS

ITEM	QTD	DESCRIÇÃO
1	1	Depósito cilíndrico 230 L
2	1	Depósito cilíndrico 125 L
3	4	Canhão de depósito de ligação
4	1	Isolamento térmico

Projetado por: Cleber Pizzatto Dallegrave		Descrição do componente: Reservatório térmico		Diedro:
Revisado por: Luis Frólén Ribeiro		Projeto: Coletor solar flexível		
Data: 8/10/2019	Massa: 29.09 kg	IPB INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior de Tecnologia e Gestão		Escala: 0.07 : 1
				Folha: 1/1

4.3. Fabricação da bancada

Fabricou-se a bancada no Laboratório de Tecnologia Mecânica do IPB. A bancada é composta pela estrutura para o coletor solar, que permite a variação da sua inclinação, e pela estrutura para o reservatório térmico.

A Figura 4.5 apresenta os componentes do sistema: quadro da estrutura para o coletor, os apoios em A e a estrutura para o reservatório.

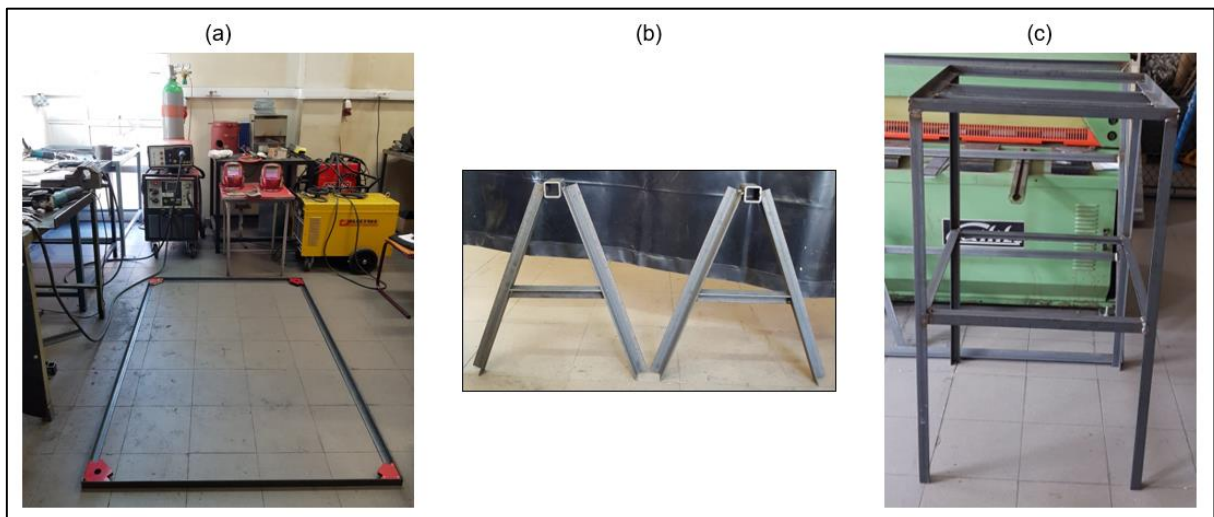


Figura 4.5 – Componentes da bancada: (a) quadro da estrutura para o coletor, (b) Apoios em A, (c) estrutura para o reservatório.

4.4. Teste numérico

O sistema foi simulado para investigar o comportamento e a eficiência do coletor sob os dados reais de operação de uma cidade europeia de clima temperado. Devido às limitações computacionais, o tempo de simulação foi apenas para a primeira hora (3600 segundos), que corresponde a 10% do tempo solar total durante um dia de inverno em Bragança que é, em média, de 10 horas. Ignorou-se o consumo de água durante o dia.

Foram criados pontos na entrada e na saída do coletor. Com esses pontos se extraiu os dados da temperatura e da velocidade.

A Figura 4.6 mostra o comportamento da temperatura na saída do coletor e a Figura 4.7 apresenta o caudal mássico na saída do coletor. Nessas figuras se observa que o comportamento do aquecimento da água está relacionado ao fluxo de calor (conforme o gráfico apresentado na Figura 3.9). Há um aumento na taxa de aquecimento da água e do caudal mássico correspondentes ao aumento do fluxo de calor.

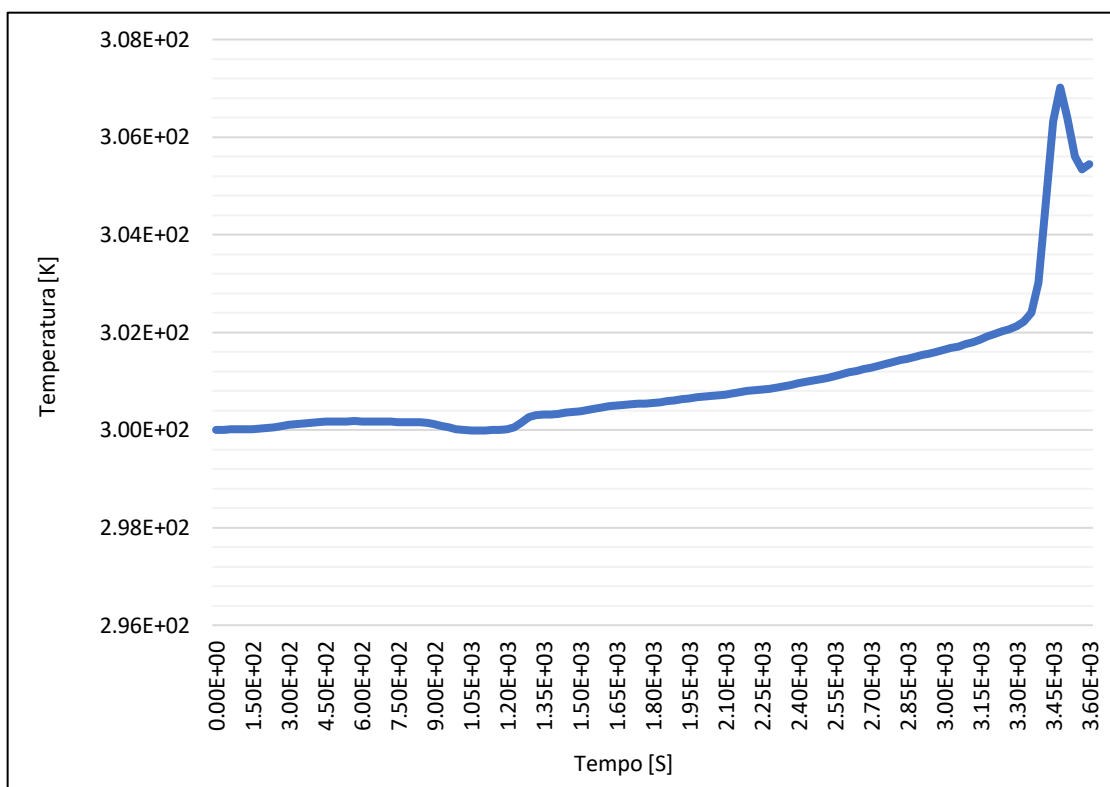


Figura 4.6 – Comportamento da temperatura na saída do coletor.

Durante a primeira hora de operação o coletor elevou a temperatura de saída da água em, aproximadamente, 6 K. Percebe-se, também um aumento progressivo do efeito termossifão desde os primeiros momentos de operação, fornecendo um caudal mássico de $1,75E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ (6,3 litros por hora). É importante sempre manter os valores de caudal abaixo de 40l/h para não prejudicar o efeito de termossifão.

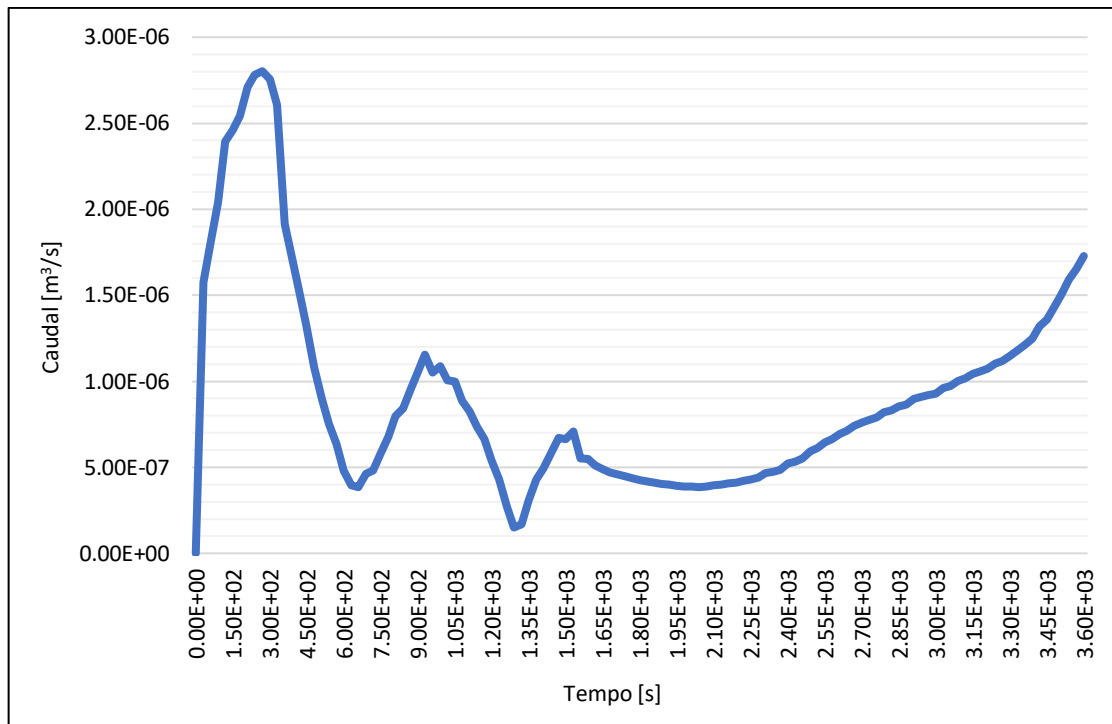


Figura 4.7 – Comportamento do caudal mássico na saída do coletor.

Esses resultados correspondem à radiação do inverno de Bragança. Noutras épocas do ano maiores fluxos solares produzirão maiores temperaturas de saída e caudal mássico.

Valores baixos de caudais mássicos resultam numa eficiência do coletor menor. Entretanto, ocorre uma maior transferência de calor associado aos baixos valores de caudal mássico devido ao maior tempo que o fluido passa em contato com o coletor, gerando temperaturas de saída mais elevadas.

Isso é notório, também, através da Equação (3.4). A quantidade de calor absorvido pela água é proporcional ao caudal. Contudo, se o caudal for elevado haverá uma maior quantidade de fluido para ser aquecido, resultando numa menor diferença entre as temperaturas de entrada e de saída no coletor. Ainda, essa diferença de temperatura também é proporcional à quantidade de calor absorvido, isto é, a temperatura na saída do coletor será maior se a quantidade de calor absorvido for maior. Os estudos de [16] comprovam que existe um ponto ótimo de caudal. Maior caudal implica

num coeficiente de convecção maior, intensificando a troca de calor entre a água e o coletor, o que favorece a troca de calor com o ambiente externo, aumentando as perdas.

4.5. Avaliações energéticas e rendimento do coletor

Os dados obtidos na simulação para a primeira hora de operação do coletor solar inserido no sistema de aquecimento de água foram aplicados nas equações apresentadas na Seção 3.4.

A potência calorífica determinada pela Equação (3.4) foi de 32,35 W. Inseriu-se nessa equação o caudal mássico de $1,75E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,00129 \text{ kg/s}$), o calor específico de $4186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ e a elevação da temperatura de 6 K.

A potência térmica absorvida encontrada pela Equação (3.5) foi de 43,33 W. Considerou-se a absorvidade da placa de 0,8, a média da radiação solar para a primeira hora durante os dias de inverno de $51,1 \text{ W/m}^2$ e a área do coletor de $1,06 \text{ m}^2$.

Assim, pela diferença entre a potência calorífica e a potência térmica absorvida foi encontrada a potência térmica perdida pelo coletor de 10,97 W. O coeficiente global de perdas resultou em $10,36 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Portanto, a eficiência do coletor obtida na primeira hora de operação para um dia de inverno em Bragança foi de 59,73%.

Tabela 4.3 – Avaliação do coletor para a primeira hora de operação.

Potência calorífica [W]	Potência térmica absorvida [W]	Potência térmica perdida [W]	Eficiência [%]
32,35	43,33	10,97	59,73

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Nesse trabalho foi projetado um coletor solar flexível e de baixo custo composto por três camadas: cobertura transparente, camada absorvedora e camada para isolamento. A união das camadas é feita através de velcro. A camada absorvedora possui cinco canais para aquecimento da água que comportam 18 litros e entre eles há um espaçamento para a realização de vulcanização. A ligação do coletor com os tubos multicamadas ocorre através de casquilhos inseridos no seu interior e nas extremidades superior e inferior contém ilhós para fixar o coletor na estrutura. As dimensões externas do coletor são de 1280 mm de comprimento e 832 mm de largura.

Projetou-se e construiu-se uma bancada para a realização dos testes. A bancada é composta por uma estrutura para o coletor solar e uma estrutura para o reservatório. Também, um reservatório térmico foi projetado com dois depósitos cilíndricos e lã de rocha como isolamento térmico. No total, o projeto do sistema de aquecimento solar de água possui 20 desenhos cotados.

Selecionou-se para as medições das temperaturas na entrada e na saída do coletor termopares do tipo T e para medir o caudal o instrumento escolhido foi um sensor de pulso de fluxo de água DN 20 G3/4. Os dados da radiação solar foram disponibilizados pelo Laboratório de Agroclimatologia da Escola Superior Agrária de Bragança.

A ideia inicial do trabalho consistia na realização de testes reais do coletor. Entretanto, devido à pandemia causada pelo novo coronavírus (SARS-COV-2) as simulações feitas no coletor passaram a ser numéricas. Por isso, simulou-se o sistema

de aquecimento solar de água com os dados do inverno da cidade de Bragança, Portugal, por ser a estação do ano mais extrema.

Através dos dados obtidos nas simulações realizadas, tendo em vista as simplificações adoptadas e desconsiderando o consumo de água, na primeira hora de operação o coletor elevou a temperatura da água em 6 K. A potência calorífica desse processo foi de 32,35 W, resultando na eficiência de 59,73%.

Destaca-se a importância de manter a temperatura de trabalho abaixo da temperatura admissível dos materiais para não deteriorar os componentes do sistema. Também, no verão pode ocorrer a ebulição da água. Por isso, deve-se dimensionar corretamente o sistema.

Durante o desenvolvimento desse trabalho um resumo foi submetido e aceito no *XVII Congreso Ibérico y XIII Congreso Iberoamericano de Energía Solar* [17]. O artigo para publicação já foi elaborado e aguarda-se apenas a divulgação da nova data de entrega, adiada por conta da pandemia, bem como a apresentação do pôster no congresso.

5.2. Propostas para trabalhos futuros

Visando melhorar o desenvolvimento do coletor solar flexível e de baixo, custo sugere-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- simular o coletor considerando o consumo de água durante o dia;
- fabricar o protótipo funcional do coletor solar flexível;
- concluir os testes reais de operação do coletor inserido num sistema de aquecimento solar de água;
- refinar os cálculos das simulações com as propriedades do PU com proteção contra raios UV;

- fazer uma avaliação financeira do projeto para verificar viabilidade econômica do coletor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. K. D. O. M. Varella and M. I. D. S. Guerra, “Análise Do Desempenho Térmico De Um Sistema De Aquecimento Solar De Baixo Custo Na Cidade De Mossoró (Rn),” *Holos*, vol. 4, 2014, doi: 10.15628/holos.2014.1266.
- [2] Vida solar, “História do aquecedor solar,” 2015. <http://www.vidasolar.com.br/historia-do-aquecedor-solar> (accessed Mar. 11, 2020).
- [3] J. Henry, “A Evolução dos Aquecedores de Água Solares,” 2020. <https://meioseculodeaprendizagens.blogspot.com/2015/08/a-evolucao-dos-aquecedores-de-agua.html> (accessed Mar. 11, 2020).
- [4] D. dos S. Scaramelli, “Estudo do desempenho de um coletor solar flexível de baixo custo,” p. 86. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2018.
- [5] M. A. T. Oliveira, “Desenvolvimento industrial de coletor solar flexível,” p. 91. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2019.
- [6] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 4th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- [7] C. Borgnakke and R. E. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*, 8th ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [8] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [9] “Flat Plate Solar Collector Design,” 2020. <https://solartribune.com/flat-plate-solar-system/> (accessed Mar. 15, 2020).
- [10] “Heat Transfer Systems,” 2020. <http://www.southgateprocess.com/xlg-uhs-heat-transfer-systems/> (accessed Mar. 17, 2020).
- [11] “Distribuição e ligação entre colectores,” 2020, Accessed: Mar. 15, 2020. [Online]. Available: <https://www.tisst.net/documentos/sistemas-solares-termicos/tipos-de-ligacao-entre-colectores/>.
- [12] Ansys Inc., “Ansys Student 2019 R3: Workbench/Fluent.” 2019.
- [13] I. Patkó, A. Szeder, and C. Patkó, “Evaluation the impact tilt angle on the sun

- collectors,” *Energy Procedia*, vol. 32, pp. 222–231, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.029.
- [14] L. Arruda, “Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos”. Tese (Doutoramento em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. doi:10.11606/T.3.2004.tde-29092004-145949. Acesso em: 2020-02-17.
- [15] B. Freegah, “Design, developement and optimisation of a novel thermo-syphon system for domestic applications,” p. 292, Tese (Doutoramento). University of Huddersfield. 2016.
- [16] R. A. Jordan, O. Seye, and A. V. de A. Motomiya, “Influência da vazão de água sobre o rendimento de um coletor solar plano construído em termoplástico,” *Eng. Agrícola*, vol. 35, no. 4, pp. 665–675, 2015, doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v35n4p665-675/2015.
- [17] C. P. Dallegrave, M. A. T. Oliveira, D. dos S. Scaramelli, L. T. Warikoda, and L. M. F. Ribeiro, “Desenvolvimento de um Coletor Solar Flexível e de Baixo Custo,” *XVII Congr. Ibérico y XIII Congr. Iberoam. Energía Sol.*, 2020.
- [18] SolidWorks Corporation, “SolidWorks.” 2019.
- [19] W. J. Bailey, “Solar Heater,” USA, 1910, doi: No. 966,070.
- [20] EN 12975–2:2001, *Thermal Solar Systems and Components - Solar Collector - Part 2: Test Methods*. CEN – European Committee for Standardization. Brussels, 2001.
- [21] ASHRAE/ANSI Standard 93–2003, *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, 2003.
- [22] K. Balaji, P. Ganesh Kumar, D. Sakthivadivel, V. S. Vigneswaran, and S. Iniyan, “Experimental investigation on flat plate solar collector using frictionally engaged thermal performance enhancer in the absorber tube,” *Renew. Energy*, vol. 142, pp. 62–72, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.078.
- [23] R. Bandaru, C. Muraleedharan, and P. K. Pavan, “Modelling and dynamic simulation of solar-thermal energy conversion in an unconventional solar thermal water pump,” *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 292–305, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.10.108.
- [24] D. R. Bortoletto and C. C. Pezzuto, “Análise de desempenho de um aquecedor solar de baixo custo: reservatório térmico alternativo,” *An. do XVII Encontro Iniciação Científica / An. do II Encontro Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação*, 2012.
- [25] P. Filipović, D. Dović, B. Ranilović, and I. Horvat, “Numerical and experimental approach for evaluation of thermal performances of a polymer solar collector,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, no. May, pp. 127–139, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.023.

- [26] T. Leephakpreeda, "Study of Conversion Efficiency of Tube- type Solar Thermal Collectors," *Analysis*, vol. 15, no. 2, 2010.
- [27] S. H. Hammadi, "Study of solar water heating system with natural circulation in basrah," *Al-Qadisiya J. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 3, 2009.
- [28] "Convecção," 2020. http://help.solidworks.com/2019/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Convection.htm (accessed Mar. 16, 2020).
- [29] Germany, "Incidence Angle Modifier - Reference," 2006, [Online]. Available: <https://www.solarthermalworld.org/sites/gstec/files/Standard EN 12975 - 2.pdf>.
- [30] I. Zeghib and A. Chaker, "Modeling and simulation of a solar thermal system for domestic space heating using radiators low temperature," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 266–276, 2015, doi: 10.20508/ijrer.80148.
- [31] C. Cristofari, G. Notton, P. Poggi, and A. Louche, "Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector," *Sol. Energy*, vol. 72, no. 2, pp. 99–112, 2002, doi: 10.1016/S0038-092X(01)00092-5.
- [32] P. M. da S. Lourenço, "Modelação de coletores solares térmicos," p. 95. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Energia e do Ambiente, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [33] F. J. Diez, L. M. Navas-Gracia, A. Martínez-Rodríguez, A. Correa-Guimaraes, and L. Chico-Santamarta, "Modelling of a flat-plate solar collector using artificial neural networks for different working fluid (water) flow rates," *Sol. Energy*, vol. 188, no. July, pp. 1320–1331, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.07.022.
- [34] A. I. Kudish, E. G. Evseev, G. Walter, and T. Leukefeld, "Simulation study of a solar collector with a selectively coated polymeric double walled absorber plate," *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 5, pp. 651–671, 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00066-8.
- [35] K. M. Pandey and R. Chaurasiya, "A review on analysis and development of solar flat plate collector," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 641–650, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.078.
- [36] K. Zelzouli, A. Guizani, and C. Kerkeni, "Numerical and experimental investigation of thermosyphon solar water heater," *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 913–922, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.064.
- [37] D. Zhang, H. Tao, M. Wang, Z. Sun, and C. Jiang, "Numerical simulation investigation on thermal performance of heat pipe flat-plate solar collector," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 118, pp. 113–126, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.02.089.
- [38] A. L. Hernández and J. E. Quiñonez, "Experimental validation of an analytical model for performance estimation of natural convection solar air heating collectors," *Renew. Energy*, vol. 117, pp. 202–216, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.09.082.

- [39] A. N. Sarode, A. A. Patil, and V. H. Patil, "Experimental and Computational Fluid Dynamics Analysis of a New Flat Plate Solar Collector," pp. 455–460, 2016.
- [40] M. C. Wirsum, "Simulation study of a large solar air heating system," p. 158. *Dissertação (Mestrado) - Curso de Mechanical Engineering*, University of Wisconsin-madison, Madison, 1988.
- [41] I. N. Unar *et al.*, "Performance evaluation of solar flat plate collector using different working fluids through computational fluid dynamics," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2005-z.
- [42] J. Mehdi Hassan, Q. J. Abdul-Ghafour, and M. F. Mohammed, "CFD Simulation of Enhancement Techniques in Flat Plate Solar Water Collectors," *J. Eng. Sci.*, vol. 20, no. 3, pp. 751–761, 2017.
- [43] Autodesk, "Inventor Professional 2020." 2020.
- [44] S. A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, vol. 30, no. 3. 2004.
- [45] W. Ariyawiriyanan *et al.*, "Thermal efficiency of solar collector made from thermoplastics," *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 500–505, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.778.
- [46] "Coletores solares térmicos," 2020, Accessed: Mar. 15, 2020. [Online]. Available: <https://pt.solar-energia.net/solar-termica/componentes/coletores-solares-termicos>.
- [47] M. B. Elsheniti, A. Kotb, and O. Elsamni, "Thermal performance of a heat-pipe evacuated-tube solar collector at high inlet temperatures," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 154, no. March, pp. 315–325, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.106.
- [48] J. Deng, T. S. O'Donovan, Z. Tian, J. King, and S. Speake, "Thermal performance predictions and tests of a novel type of flat plate solar thermal collectors by integrating with a freeze tolerance solution," *Energy Convers. Manag.*, vol. 198, no. June, p. 111784, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111784.
- [49] K. Anirudh and S. Dhinakaran, "Performance improvement of a flat-plate solar collector by inserting intermittent porous blocks," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 428–441, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.015.
- [50] S. Şevik and M. Abuşka, "Thermal performance of flexible air duct using a new absorber construction in a solar air collector," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 146, no. September 2018, pp. 123–134, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.100.
- [51] R. Fontes, "Origem da energia solar: uma breve história do sol como fonte energética do mundo," 2020. <https://blog.bluesol.com.br/origem-da-energia-solar/>.
- [52] A. M. Lenz, S. N. M. de Souza, C. E. C. Nogueira, F. Gurgacz, M. Prior, and F. A. Pazuch, "Analysis of absorbed energy and efficiency of a solar flat plate

- collector,” *Acta Sci. - Technol.*, vol. 39, no. 3, pp. 279–284, 2017, doi: 10.4025/actascitechnol.v39i3.29352.
- [53] F. Mauthner, W. Weiss, and M. Spörk-Dür, “Solar Heat Worldwide,” p. 66, 2015, [Online]. Available: <https://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/solar-heat-worldwide-2015.pdf>.
- [54] A. B. Lopo, “Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar de Baixo Custo,” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- [55] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. Danvers, 2007.
- [56] D. A. J. Jurado and O. S. H. Mendoza, “Modelagem dinâmica de um sistema solar termossifão usando coletores atmosféricos de plástico,” *13º POSMEC Simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica*. 2003.
- [57] A. C. F. Mendes and L. G. M. Vieira, “Comparação de desempenho entre um aquecedor solar de baixo custo (ASBC) e seu similar convencional,” Uberlândia, 2008.
- [58] R. Celuppi, J. Scapinello, F. G. D. Andrade, J. H. P. Revello, and J. D. Magro, “Solar energy use for water pre-heating in boilers of agro-industries,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 34, pp. 451–460, 2014, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [59] E. P. dos Reis, “Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar utilizando coletor com superfície absorvedora em chapas de PVC,” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências), p. 84, 2009, [Online].
- [60] R. Tang, Y. Cheng, M. Wu, Z. Li, and Y. Yu, “Experimental and modeling studies on thermosiphon domestic solar water heaters with flat-plate collectors at clear nights,” *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 12, Elsevier Ltd, Kunming, pp. 2548–2556, 2010.
- [61] J. A. Rangababu, K. Kiran Kumar, and S. R. Srinivasa, “Numerical analysis and validation of heat transfer mechanism of flat plate collectors,” *Procedia Engineering*, vol. 127, Warangal, pp. 63–70, 2015.
- [62] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Energia Solar,” *Atlas da Energ. Elétrica do Bras.*, p. 14, 2005, [Online]. Available: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf).