

**DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL DE COLETOR
SOLAR FLEXÍVEL**

MATHEUS ANTONIO TEIXEIRA DE OLIVEIRA

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

Para obtenção do grau de Mestre em
**Engenharia Industrial
Ramo de Engenharia Mecânica**

Orientador do IPB:
Professor Doutor Luís Manuel Frólén Ribeiro
Co-Orientador do CEFET/RJ
Professor Doutor Rafael Prudencio Sacsa Diaz

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades que me deu e por ter guiado meu caminho.

Quero agradecer também a minha família, especialmente meus pais, minha irmã e namorada por terem sempre apoiado minhas decisões e estarem comigo e disponibilizado tudo que precisei.

Agradeço aos meus professores orientador e co-orientador pela disposição e apoio dados durante o desenvolvimento dessa Dissertação.

Quero agradecer ao Instituto Politécnico de Bragança por disponibilizar os recursos necessários para desenvolver o projeto e ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca por conceber a oportunidade de realizar o intercâmbio e todo ensino passado a mim.

Um agradecimento à FactoryPlay pelo suporte na realização do projeto.

Agradeço também a todos os amigos, novos e antigos que me acompanharam durante esse último ano.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido o projeto de um coletor solar flexível, de baixo custo, de fácil transporte e com boa maneabilidade, que atendesse a demanda de água quente tanto em cidades de clima temperado quanto em cidades tropicais. Para isso, foram feitas simulações numéricas para verificar o desempenho e acompanhou-se o processo de produção de um protótipo. O material escolhido para fabricar o coletor foi o filme de Poliuretano (PU) devido ao seu preço acessível, propriedades térmicas e facilidade em encontra-lo no mercado. O coletor é constituído por 3 peças: placa absorvedora, capa para isolamento e cobertura transparente. Dois modelos de coletores foram desenhados no software SolidWorks e simulados no ANSYS®, em situações climáticas do inverno no Porto e em Fortaleza. Após realizar as simulações do primeiro modelo, foi construído um protótipo demonstrativo para identificar as oportunidades de melhoria encontradas em sua produção, a partir do comportamento observado, o segundo modelo foi desenvolvido, mais barato e de fabricação mais rápida. Mesmo com a redução de custos na fabricação, ambos os modelos apresentaram desempenho similar em 2,5%. Das simulações verificou-se que o sistema com um único coletor, ao final do dia, aquecia a água de um reservatório com 150 litros de 20 °C para 30,61 °C no Porto e para 38,12 °C em Fortaleza. Com dois coletores ligados em paralelo, a temperatura da água ao fim do dia era de 39,77 °C no Porto e de 49,72 °C em Fortaleza. Por fim, ao analisar a influência da velocidade de escoamento no desempenho do coletor, percebeu-se que, em três velocidades analisadas, quanto mais lento é o escoamento, maior é o aquecimento da água pelo coletor, atingindo uma eficiência (ignorando as perdas de calor) de 88% para a velocidade do fluido de 0,02 m/s, com número de Reynolds de 300, ou seja, com Escoamento Laminar.

PALAVRAS CHAVES: Coletor Solar Flexível, Coletor Solar de baixo custo, Energia solar, aquecimento de água residencial, Simulações numéricas.

ABSTRACT

A flexible solar collector project was developed in this work, aiming to be low cost, easy transportation and good handling, and that also meets the demand of hot water in both tropical and temperate cities. To verify the collector performance, numerical simulations were done and, to improve its manufacturing, a prototype was built. Its chosen material was Polyurethane film (PU) due to its affordable price, thermal properties and market availability. The collector is composed by three parts: an absorber plate, an isolation cover and a transparent roof. Two collectors' models were designed in SolidWorks and simulated in ANSYS®, under Porto and Fortaleza winter conditions. After performing the simulations of the first model, a demonstrative prototype was built to identify the possible improvements found in its production. From what was observed, the second model was developed, cheaper and of easier manufacturing. Despite the cost reduction, the models presented only 2,5% of difference in their results. A system with one designed collector could heat, by the end of the day, water in a tank with a volume of 150 liters from 20 °C to 30,61 °C in Porto and to 38,12 °C in Fortaleza. While with two collectors connected in parallel, the water temperature went to 39,77 °C in Porto and 49,72 °C in Fortaleza. Lastly, when analyzing the influence of flow velocity in the collector performance, the slowest of the three velocities analyzed has the best water heating, reaching a maximum efficiency (disregarding the losses) of 88% for the fluid velocity of 0,02 m/s and Reynolds number of 300, meaning that the system has a laminar flow.

KEYWORDS: *Flexible Solar Collector, Low cost Solar Collector, Solar Energy, water heating, numerical simulation.*

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objetivos	2
2. Estado da Arte	3
2.1. Evolução do Coletor solar	3
2.2. Linhas de pesquisas atuais	7
2.3. Trabalho prévio	10
3. Fundamentação Teórica	13
3.1. Transferência de Calor	13
3.1.1. Condução	13
3.1.2. Convecção	14
3.1.3. Radiação	14
3.2. Coletor Solar	15
3.3. Coeficiente Global de perdas de calor do coletor	16
3.4. Efeito Termossifão	17
3.5. Desempenho do coletor solar	18
3.6. Estratificação	19
4. Materiais e Métodos	20
4.1. Primeiro modelo de coletor	20
4.1.1. Primeiro coletor solar	20
4.1.2. Reservatório e tubagens	27
4.1.3. Sistema Simulado	27
4.1.4. Ângulo de inclinação e Geometria	29
4.1.5. Malha	30
4.1.6. Configuração do <i>Ansys Fluent</i>	31
4.1.7. Condições de contorno	33
4.1.8. Fluxo de Calor	33
4.1.9. Fabricação do primeiro Protótipo	35
4.2. Segundo modelo de coletor	42
4.2.1. Características geométricas do segundo coletor	43

4.2.2.	Dimensionamento estrutural	48
4.2.3.	Simulações.....	49
4.2.4.	Processo de Fabrico do Segundo Protótipo.....	53
5.	Resultados e Discussão.....	57
5.1.	Sistema no Porto.....	58
5.2.	Sistema em Fortaleza	62
5.3.	Comparação com o modelo teórico.....	66
5.4.	Análise da placa.....	67
5.5.	Primeiro Protótipo	69
5.6.	Coletor otimizado	71
5.6.1.	Medidas do modelo.....	71
5.6.2.	Dimensionamento estrutural	72
6.	Conclusões.....	73
6.1.	Trabalhos futuros.....	75
7.	Referências Bibliográficas
	Apêndice.....	.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Desenho da patente de William Bailey [10].....	3
Figura 2.2 - Desenho do reservatório/coletor [21]	6
Figura 2.3 - Modelo numérico e divisão das zonas [1]	11
Figura 3.1 - Coletor solar plano tradicional [1].....	15
Figura 4.1 - Coletor em vista isométrica e algumas vistas em detalhe.....	21
Figura 4.2 - Reservatório proposto por Jurado [38]	27
Figura 4.3 - Sistema para ser simulado	28
Figura 4.4 - Modelo numérico do sistema completo.....	30
Figura 4.5 - Malha com a função “Curvature”	31
Figura 4.6 - Fluxos de calor em cada cidade sobre o coletor	34
Figura 4.7 - Peças do coletor 2D planificadas no software. 1- Peça superior; 2- Peça inferior; 3,4- Paredes laterais; 5- Capa para isolamento.....	40
Figura 4.8 - Peças enroladas (e) e organizadas na bancada (d)	41
Figura 4.9 - Exemplo de marcações	41
Figura 4.10 - Etapas da costura do coletor. 1 – Costura do Velcro nas paredes laterais; 2 – Costura das paredes laterais com a peça superior; 3 – Costura entre as peças superior e inferior; 4 – Coletor completamente cosido	42
Figura 4.11 - Segundo modelo de coletor solar.....	43
Figura 4.12 - Sistema com a altura h para o cálculo da Ph	49
Figura 4.13 – Sistema para simular com 1 coletor (e) e dois coletores (d)	50
Figura 4.14 - Malha com a função "Proximity and curvature"	51
Figura 4.15 - Condições de contorno da simulação na placa	52
Figura 5. 1 - Distribuição de temperatura do fluido no sistema	57
Figura 5.2 - Comportamento da temperatura de uso no inverno do Porto com uma placa	58
Figura 5.3 - Comportamento da temperatura de saída no inverno do Porto com uma placa	59
Figura 5.4 - Comportamento do caudal mássico no inverno do Porto com uma placa	59
Figura 5.5 - Comportamento da temperatura de uso no inverno do Porto com duas placas	60
Figura 5.6 - Comportamento da temperatura de saída no inverno do Porto com duas placas	61
Figura 5.7 - Comportamento do caudal mássico no inverno do Porto com duas placas	61
Figura 5.8 - Comportamento da temperatura de uso no inverno de Fortaleza com uma placa	62
Figura 5.9 - Comportamento da temperatura de saída no inverno de Fortaleza com uma placa.....	63
Figura 5.10 - Comportamento do Caudal mássico no inverno de Fortaleza com uma placa	63
Figura 5.11 - Comportamento da temperatura de uso no inverno de Fortaleza com duas placas	64
Figura 5.12 - Comportamento da temperatura de saída no inverno de Fortaleza com duas placas.....	64
Figura 5.13 - Comportamento do Caudal mássico no inverno de Fortaleza com duas placas	65
Figura 5.14 - Variação na Temperatura no Porto para as três velocidades de entrada analisadas	68
Figura 5.15 - Variação na Temperatura em Fortaleza para as três velocidades de entrada analisadas .	68
Figura 5.16 - Primeiro protótipo fabricado	69
Figura 5.17 - Coletor insuflado	70
Figura 5.18 - Simulação de isolamento com papelão; 1- capa da camada isolante; 2- Papelão com 18 mm de espessura; 3- Placa absorvedora.	70
Figura 5.19 - Coletor enrolado	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Invenções de sistemas de aquecimento de água no século passado	5
Tabela 2.2 – Linhas de estudo de Pandey [28] e suas respectivas melhorias.....	10
Tabela 2.3 – Cidades estudadas e seus respectivos ângulos de inclinação (β).....	12
Tabela 4.1 – Latitude e Ângulo de inclinação da placa.....	29
Tabela 4.2 - Nós e Elementos com a função “Curvature”.....	31
Tabela 4.3 - Propriedades PVC.....	33
Tabela 4.4 - Características estruturais do Poliuretano [41].....	48
Tabela 4.5 - Nós e Elementos com a função “Proximity and curvature”.....	51
Tabela 5.1 - Dados da simulação no inverno do Porto.....	62
Tabela 5.2 - Dados da simulação no inverno de Fortaleza.....	66
Tabela 5.3 - Comparação dos dados para o inverno do Porto.....	66
Tabela 5.4 - Comparação dos dados para o inverno de Fortaleza.....	66
Tabela 5.5 - Eficiência e picos de temperatura	69

1. Introdução

O presente trabalho deu continuidade ao estudo iniciado por Douglas Scaramelli [1] aperfeiçoando o projeto de um coletor solar flexível de baixo custo. Relativamente ao seu trabalho foram desenvolvidos dois modelos de coletores e feitas análises numéricas para verificar o desempenho de cada um. A modelação foi feita no software SolidWorks e a simulação foi realizada através do método de elementos finitos utilizando o software Ansys.

Também foi construído um protótipo não funcional do coletor em parceria com a empresa FactoryPlay®, para identificar oportunidades de melhoria na sua fabricação.

1.1. Enquadramento

A energia solar é uma alternativa a outras fontes tradicionais de energia. Uma das aplicações mais simples e diretas desse tipo de energia é a conversão da radiação solar em calor. A radiação solar pode ser amplamente utilizada no aquecimento de água sanitária em residências. Neste caso, a radiação é convertida em calor com o uso de coletores solares. Apesar da ideia de aquecer água com energia do sol não ser novidade, essa tecnologia de aquecimento se desenvolveu muito no século passado.

A utilização da energia solar como fonte de aquecimento de água tem crescido nos últimos anos. Na Europa, ao final de 2015, os sistemas de aquecimento solar de água alcançaram 47,5 milhões de metros quadrados de área de coletores instalados, com capacidade de gerar 33,3 GWth, representando um crescimento de 4,4% em relação ao ano anterior [2].

Como foi dito anteriormente, a principal tecnologia utilizada no aquecimento de água com radiação é o coletor solar. Coletor solar é um tipo especial de permutador de calor no qual a troca de calor ocorre entre uma fonte distante (sol) e um fluido de transferência que está no coletor [3]. A radiação do sol atinge a placa absorvedora do coletor e a energia térmica é transferida para o fluido. A radiação é captada pelos canais do aquecedor solar e o calor é transferido para o fluido através de convecção. Com base no seu desenho, os coletores podem ser classificados como coletores concentradores ou coletores planos. O coletor solar plano é o tipo mais comercialmente difundido, por ser o mais simples e barato de ser produzido.

1.2. Motivação

A tecnologia de aquecimento de água mais comumente utilizada em Portugal é por meio do uso de gás, cujo custo médio é de 0,08 €/kWh, o qual foi considerado o sexto mais caro da União Europeia em 2017 de acordo com a Eurostat [4]. A principal tecnologia para aquecimento de água no Brasil é o chuveiro elétrico que segundo o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia [5], é um equipamento barato, de fácil instalação e com boa eficiência energética.

Entretanto a energia elétrica está se tornando cada vez mais cara no Brasil. Diversos ministros de Minas e Energia, ao longo dos últimos anos, fizeram campanhas para reduzir o consumo de energia e já até levantaram hipóteses de decretar um racionamento de 10% a 20% da carga consumida.

Em ambos os casos, o aquecimento de água mostra-se um custo considerável dentro das despesas de uma residência. Tendo esses dados como base, o coletor solar flexível é um equipamento barato e de fácil manuseio, que pode ser usado para aquecer e disponibilizar água sanitária dentro dos parâmetros de conforto [6] nas residências com menor poder aquisitivo e de áreas remotas, sendo acessível para todas as camadas sociais.

Alternando para a questão ambiental, a geração de energia elétrica pela combustão de combustíveis fósseis é prejudicial ao meio-ambiente, visto que a emissão de gases poluentes é agressiva para a atmosfera. A utilização de hidrelétrica para produção de eletricidade também gera prejuízos ambientais, uma vez que poderá ser necessário inundar grandes áreas para a instalação de uma usina.

Neste ponto a utilização do coletor solar também tem seu impacto positivo, visto que essa tecnologia utiliza apenas a radiação solar como combustível e necessita de uma pequena área de instalação, normalmente no próprio telhado das residências.

1.3. Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento teórico experimental de um coletor solar flexível com importantes características baseadas no baixo custo, fácil transporte e maneabilidade, capaz de atender a demanda de água quente em cidades de clima temperado e tropical. O objetivo secundário será avaliar o desempenho dos coletores através da realização de simulações numéricas. Os resultados das simulações permitirão aperfeiçoar a produção do coletor junto ao processo produtivo de um protótipo experimental.

2. Estado da Arte

O sol é o combustível mais econômico para aquecimento de água, além de ser uma fonte renovável de energia [7]. Parte da radiação solar pode ser absorvida e transformada em energia térmica utilizando-se equipamentos projetados para esse propósito [8]. O setor solar térmico cresceu consideravelmente a nível global, a capacidade de sistemas de aquecimento solar instalados cresceu cerca de 600% entre 2000 e 2015 [9].

2.1. Evolução do Coletor solar

O primeiro sistema de aquecimento de água através da energia solar e circulação natural patenteado foi em 1909 por William J. Bailey nos Estados Unidos. O sistema consistia em tubos finos e de grande comprimento, que ficam expostos ao sol e por onde a água atravessa. Acoplado a essa placa está um tanque, que deve ser obrigatoriamente instalado acima da placa para que ocorra o efeito de Termossifão. Além disso, o reservatório também contava com uma camada isolante [10].

A Figura 2.1 mostra o desenho da invenção, publicado na seção de patentes norte-americana da época:

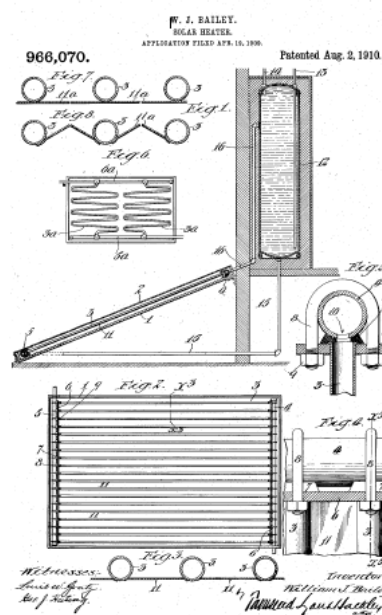


Figura 2.1 - Desenho da patente de William Bailey [10]

Em 1961, Edward W. Gough e Paul D. Irwin [11] constataram que os coletores solares presentes na época eram ineficientes, visto que os sistemas eram projetados de tal maneira que a água precisava percorrer grandes distâncias, perdendo calor no processo. Segundo Gough, o revestimento de tinta preta no metal, apesar de absorver bem o calor, é um mau condutor. Em 1963, esses autores desenvolveram e patentearam um coletor retangular de plástico rígido, com base corrugada de isolante térmico, um forro plástico preto junto à base e tubos alternados nas extremidades da placa.

Pensando na aplicação de coletores solares para aquecimento de piscinas, John McColgan e Philip O'Brien [12] desenvolveram, em 1978, um sistema de coletores solares em plástico flexível singular. A invenção consistia em uma placa isolante plástica, fina e flexível flutuando sobre a superfície da piscina, tendo a sua superfície superior fixada em diversos tubos flexíveis de plástico, preferencialmente pretos, através dos quais a água da piscina irá circular durante as horas de irradiação solar. Várias dessas placas seriam utilizadas para cobrir a maior parte da piscina que, por sua vez, seria coberta por um plástico fino e transparente. O sistema funciona como um coletor plano na piscina durante o dia e serve como isolante térmico e barreira de vapor ao mesmo tempo.

A Tabela 2.1 apresenta algumas invenções do século passado, ela possui as patentes norte-americanas levantadas anteriormente [1], com adição de patentes de outros países:

Tabela 2.1 – Invenções de sistemas de aquecimento de água no século passado

Invenção	Inventor	País	Ano
Aquecedor solar com circulação natural, onde as aletas de material condutor de calor podem ser arranjadas colinearmente ou de modo a concentrar os raios solares para os tubos.	Bailey [10]	EUA	1910
Coletor solar de plástico rígido possuindo tubos com extremidades intercalando-se, um forro de plástico preto afixado à base em baixo do painel e uma cobertura de plástico transparente.	Gough e Irwn [11]	EUA	1963
Coletor solar concentrador composto por tiras, sendo elas normais ou reflexivas.	Christoffersson [13]	Suécia	1977
Coletor solar plano para aquecimento de fluidos que utiliza placas justapostas, espaçadas com o auxílio de espaçadores ou deformações impostas na própria chapa	Barreto, Lombardi e Junior [14]	Brasil	1977
Combinação de coletor solar plano e permutador de calor composto por duas placas de vidro ou plástico, espaçadas paralelamente e vedadas hermeticamente entre elas.	Roark [15]	EUA	1978
Coletor solar flexível produzido essencialmente com materiais plásticos que flutua na superfície da piscina, cobrindo a maior parte desta.	McColgan e O'Brien [12]	EUA	1978
Coletor solar flexível com duas camadas de plástico pigmentadas seladas termicamente para formar um caminho alongado que serve de passagem para o fluido.	Crombie e Crombie [16]	EUA	1979
Coletor solar para o aquecimento de ar, constituído por uma ou superfície transparente superior, uma caixa de estrutura e suporte e telas absorvedoras são dispostas em camadas paralelas ao fluxo de ar no interior da caixa.	De Paiva [17]	Brasil	1980
Conjunto de coletor solar com circulação natural. Dois coletores de água interligados por tubos flexíveis de borracha.	Zinn [18]	EUA	1982
Coletor constituído pela placa absorvedora, uma estrutura auto compensadora com suportes e um reservatório de posicionado de tal maneira que os raios solares cheguem nele após refletir em uma parede prismática parabólica.	Van Massenhove [19]	Bélgica	1983
Coletor solar leve e de baixo custo formado por uma peça de vidro posicionada na parte superior, placa absorvedora no centro e uma camada isolante inferior, essas peças eram conectadas através de trilhos.	Evans, Hatman e Clark [20]	Reino Unido	1983

Na cidade de Manaus, no Brasil, a radiação solar atinge a terra quase que verticalmente, então, coletores solares podem ser instalados horizontalmente, ou seja, com inclinação de 0° . A partir dessa ideia, Rejane Moraes e John Harwood [21] desenvolveram um protótipo de tanque que serve tanto para armazenamento, quanto para aquecimento da água, seguindo os princípios de funcionamento de um coletor solar plano. O coletor consiste em um tanque raso, metálico, pintado de preto e instalado dentro de uma caixa de isolante (madeira), coberto por uma folha de plástico transparente e uma tampa de vidro. Foram realizados testes para aquecer o reservatório com 30, 50 e 70 litros de água respectivamente, medindo temperaturas máximas alcançadas de 87° no tanque de 50 litros e 69° no tanque de 70 litros. A desvantagem desse sistema é que, devido ao seu desenho, a água perdia calor rapidamente durante a noite, a Figura 2.2 a seguir mostra o desenho do coletor desenvolvido:

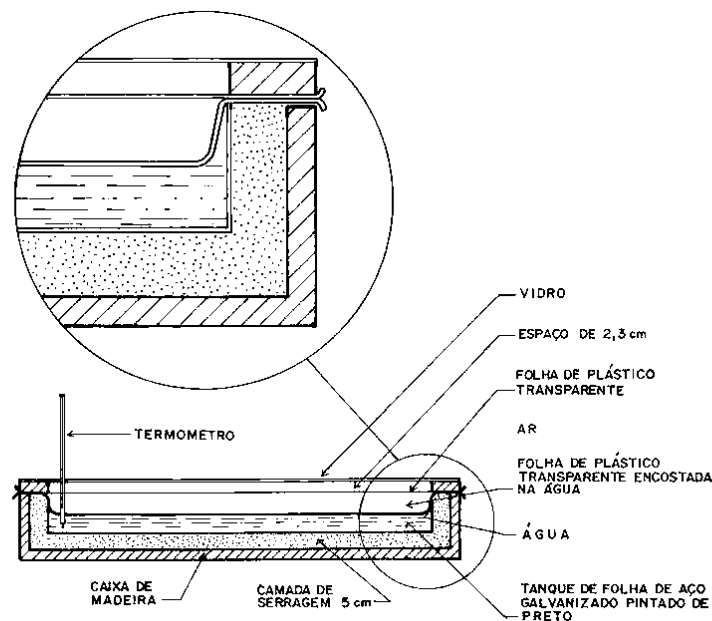


Figura 2.2 - Desenho do reservatório/coletor [21]

Borges [22] realizou um estudo das variáveis que influenciam no dimensionamento de um sistema solar aquecedor de água com energia auxiliar, visando a sua otimização. Borges considera um sistema otimizado aquele que resulta no mínimo custo de vida ao longo da vida útil do equipamento, levando em conta diversos gastos, como o de aquisição, manutenção e despesas com energia auxiliar. O objetivo do trabalho foi desenvolver um método computacional para calcular esse dimensionamento otimizado, a partir das condições iniciais do projeto, como condições climáticas, necessidades de água quente, entre outras. Em relação aos aspectos econômicos, o método leva em consideração a análise de ciclo de vida

econômico para as alternativas de investimento do sistema a ser aquecido, utilizando diversos indicadores como o Valor Presente Líquido – VPL e o Valor Uniforme Líquido – VUL. O autor ressalta a importância de levar em consideração em uma análise econômica aplicada diversas variáveis, como o aumento do preço do combustível auxiliar (eletricidade), inflação, taxa de juros, entre outros. Já nos aspectos técnicos, sete parâmetros são levados em consideração pelo modelo: área do coletor, ângulo de inclinação da placa, azimute da placa, volume do reservatório, fator de forma do reservatório (diâmetro interno/altura interna), altura entre o duto de retorno do reservatório e as placas coletoras e temperatura ajustada no termostato do resistor interno. Quanto as variáveis relacionadas ao reservatório, o autor indica o tanque na vertical por ter um desempenho melhor do que instalado na horizontal. Desenvolveu-se um procedimento computacional que encontra o dimensionamento otimizado para um projeto de um coletor solar plano, de Termossifão para o clima de Campinas. Por fim, ao executar o programa variando dois parâmetros, o modelo de síntese encontrou soluções técnicas otimizadas para as condições do projeto.

2.2. Linhas de pesquisas atuais

O proveito da energia solar no coletor é influenciado por diversos parâmetros, sendo eles relacionados ou não com características do produto. Entre os parâmetros não relacionados estão a temperatura ambiente, incidência de raios solares, velocidade do ar, temperatura de entrada da água, entre outros. Já quanto às especificações do projeto, a quantidade de tubos e sua geometria, forma de contato entre a tubagem e o absorvedor, área de contato do absorvedor, condutividade térmica do material, espessura da placa absorvedora e tipo de isolante térmico são alguns exemplos de fatores que influenciam no rendimento do coletor. Em 2018, Ara e Prado [23] realizaram simulações numéricas para medir a influência na variação da espessura da placa e da quantidade de tubos no cálculo da eficiência de um coletor solar plano. Eles concluíram que, aumentando ambos os parâmetros (espessura da placa e número de tubos), consegue-se um aumento no fator de eficiência de 5,9%. Os mesmos autores também concluíram que, ignorando aspectos econômicos, o aumento no número de tubos é mais influente do que o aumento na espessura da placa absorvedora, e, por fim, quanto melhor for o isolamento térmico da placa, menor será o impacto desses parâmetros em sua eficiência.

Em 2013, Jordan et al. [24] realizaram testes para avaliar a influência do caudal de água no rendimento de um coletor solar plano. Devido a busca na redução de custos e de tornar a

tecnologia solar economicamente viável, o plástico foi introduzido como material para fabricação de coletores, pois apesar de possuir menos eficiência quando comparado aos metais, os polímeros são consideravelmente mais baratos. O coletor estudado foi fabricado em termoplástico e, instalado com inclinação de 33° , na cidade de Campinas, em São Paulo. A partir de quatro caudais mássicos distintos analisados, Determinou-se um valor ótimo para atingir a maior potência térmica. A potência térmica diminuiu para valores acima desse caudal ótimo, evidência de que uma menor troca de calor entre a placa e o fluído foi mais impactante do que o aumento da troca de calor por convecção. A maior potência térmica média diária encontrada de 753 W/m^2 foi obtida para o caudal mássico de $0,054 \text{ kg/s}$ (segundo maior dos quatro analisados). Os autores também destacam que os ganhos energéticos obtidos por um coletor mais simples com caudal ótimo são maiores do que recorrendo a um coletor solar clássico de metal com cobertura de vidro.

Uma investigação experimental feita em 2018 por Khedher [25] acompanhou o funcionamento de um coletor solar plano no período de inverno da cidade de Hail (latitude $27^\circ 52' \text{ N}$ longitude $41^\circ 69' \text{ E}$), localizada no norte da Arábia Saudita. O estudo foi realizado em um coletor TE39, feito de aço inoxidável e acrílico e comercializado pela empresa TecQuipment. Além do coletor, o experimento contou com uma bomba elétrica, um tanque para armazenar a água e toda instrumentação necessária para medir a temperatura da água que entra e sai do coletor, a temperatura no tanque e o fluxo. O cálculo da eficiência foi baseado na norma americana ASHRAE standard 93-2003, que foi detalhada e explicada no projeto. Após realizar as medições em seguidos dias de janeiro, começando às 09h00min e terminando às 15h00min diariamente, utilizando quatro caudais mássicos distintos e considerando alguns parâmetros do sistema constantes (como o coeficiente de perda de calor e o fator de remoção de calor), o autor percebeu que aumentando o caudal de $1,5 \text{ L/min}$ para o valor ótimo de $2,5 \text{ L/min}$, houve um ganho de 15% na eficiência. Além disso, também foi verificado que condições externas como a velocidade do vento e temperatura são mais influentes do que o caudal no sistema, e que a maior eficiência no coletor ocorre quando a temperatura da água de entrada é igual à temperatura ambiente.

A Grécia é um país com elevada energia solar incidente, de aproximadamente 1600 kWh/m^2 e sua capital Atenas, possui uma radiação diária próxima de $4,35 \text{ kWh/m}^2$, o que torna interessante a exploração de energia solar no país. A partir dessa motivação, Evangelos Bellos et al. [26] fizeram uma análise em 2015 de eficiência de um coletor solar plano no software SolidWorks, para medir o impacto do coeficiente de calor de convecção entre a água e o absorvedor. Para a simulação, as superfícies laterais e traseiras foram consideradas

adiabáticas e a distância entre o absorvedor e a cobertura foi diminuída para aumentar o efeito da radiação no modelo. Além disso, a simulação foi realizada variando três parâmetros do sistema: o produto transmitância-absorção ($\tau\alpha$), a emissividade do absorvedor e a presença ou não de cobertura. Eles concluíram que o produto transmitância-absorção ($\tau\alpha$) é diretamente proporcional à eficiência, a utilização da cobertura melhora o desempenho do coletor, o coletor solar com menor emissividade é mais eficiente e, por fim, o coeficiente de calor de convecção entre a água e o absorvedor foi próximo de 14,5% maior no teste do que no seu valor teórico.

Em 2018, Lays de Sousa et al. [27] realizaram a avaliação técnica e econômica para a substituição de um chuveiro elétrico por um coletor solar plano na cidade de Itajubá, em Minas Gerais. O dimensionamento do sistema a ser utilizado foi calculado seguindo a metodologia presente na Norma da ABNT 15569, para uma casa com cinco habitantes e a análise econômica levou em consideração três indicadores financeiros: o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa de Retorno (TIR) e o *payback*. Foi considerada uma casa com cinco habitantes, coletor solar, conexões e tanque vendidos comercialmente. Para atender a demanda da residência, foi preciso utilizar um coletor com quatro metros quadrados de área útil, instalado com inclinação de 32° (recomendada pela NBR 15569) e reservatório de 495 litros de água quente. O sistema conseguiu atender a necessidade de água sanitária da casa por aproximadamente todo o ano, necessitando de energia elétrica complementar apenas nos meses de inverno. Por fim, o estudo mostrou que o sistema é economicamente viável, com os indicadores financeiros positivos e, sendo que a partir de dois anos e três meses até o fim de sua vida útil, o equipamento traz ganhos financeiros ao utilizador.

Devido aos crescentes problemas energéticos, a energia solar vem ganhando espaço como uma fonte alternativa de energia e, além disso, estudos são desenvolvidos para melhorar o desempenho térmico de equipamentos que utilizam o sol como fonte de energia. Em 2017, Pandey [28] fez uma revisão e análise técnica sobre as pesquisas de melhorias em coletores solares planos. Foram sete temas revistos nesse estudo. Primeiro, foi citada a utilização de polímeros para construir coletores mais leves, sem perder a eficiência. A principal vantagem em utilizar mini/micro canais para o permutador de calor é o potencial de alta troca de calor por unidade de área, já o uso de nano partículas com alta condutividade de troca de calor consegue aumentar a condutividade térmica e tornar o coletor mais compacto. Os PCMs (Phase Change Materials), utilizados em conjuntos integrados de coletores térmicos podem retirar a necessidade de armazenamento de água, pois apesar da baixa condutividade térmica, eles podem absorver calor durante o dia e liberar durante a noite (aquecendo a água durante

todo o dia). Também foi analisada a utilização de dispositivos dentro dos tubos de passagem de água dos coletores, responsáveis por tornar o escoamento turbulento e aumentar a troca de calor do equipamento, a Tabela 2.2 mostra um resumo das linhas estudos analisados por Pandey:

Tabela 2.2 – Linhas de estudo de Pandey [28] e suas respectivas melhorias

Linha de estudo	Melhorias alcançadas
(a) Utilização de Polímeros	Mais barato e leve do que coletores de metal
(b) Projetos de mini/micro canais	Alto potencial de troca de calor por unidade de área e grande coeficiente de troca de calor
(c) Utilização de Nano fluidos	Economicamente viável e torna o coletor mais compacto
(d) Melhorias no <i>desgin</i> do absorvedor	Aumento na absorção de calor por radiação solar
(e) Materiais de Mudança de Fase (PCM)	Eliminação da necessidade de armazenamento do fluido
(f) Redução nas perdas de calor	Aumento na eficiência, melhorando o isolamento térmico
(g) Uso de aparelhos de melhoria	Melhoria no desempenho térmica do condutor, sem alterar as suas dimensões através do escoamento

Vale ressaltar que no presente trabalho foram estudados os tópicos (a), (d) e (f) na busca de obter um coletor barato e eficiente.

2.3. Trabalho prévio

O estudo realizado por Douglas [1] apresenta as bases do presente trabalho. Ele fez um estudo numérico utilizando o software *ANSYS/FluentTM* 18:2 para criar um modelo de coletor solar flexível de baixo custo. O desempenho do coletor foi simulado sob as condições climáticas da cidade do Porto, em Portugal, e as cidades de Fortaleza e Rio de Janeiro, no Brasil. A Figura 2.3, retirada do trabalho em questão, mostra o modelo numérico e divisão das

zonas, feito no software *SolidWorks*. O coletor possuía três partes: uma cobertura transparente para induzir o efeito estufa, uma placa coletora, por onde a água percorre e absorve calor do sol, e por fim, uma camada isolante para reduzir as perdas térmicas. O material escolhido para construção do modelo foi o filme Poliuretano (PU), entretanto, devido a falta de informações sobre as propriedades do filme de PU, a simulação foi feita com as propriedades do PVC plasticizado. Além do coletor, o sistema simulado consiste de um reservatório cilíndrico, instalado na vertical e tubos de ligação do tanque com a placa. A água circula entre o reservatório e a placa e é movida pelo efeito da Termossifão:

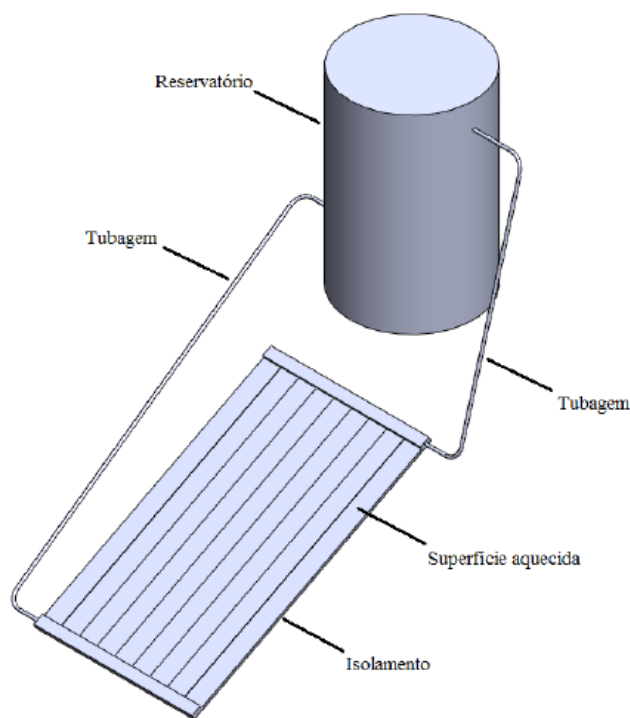


Figura 2.3 - Modelo numérico e divisão das zonas [1]

Para definir a inclinação da placa, o autor se baseou nos estudos de Patkó, Szeder et al. [29], pois seus estudos visam simplificar os cálculos. A placa deve estar virada totalmente no Sul para os países localizados no hemisfério Norte e para o Norte nos países localizados no hemisfério Sul. A Tabela 2.3 mostra os ângulos de inclinação ótimos encontrados para Porto, Fortaleza e Rio de Janeiro:

Tabela 2.3 – Cidades estudadas e seus respectivos ângulos de inclinação (β)

Cidade	Ângulo de inclinação (β)
Porto	41,2°
Fortaleza	27,2°
Rio de Janeiro	46,4°

A partir desses dados, foi feita a simulação utilizando o software Ansys, para as condições climáticas de cada cenário. Para cada caso, foram coletadas as temperaturas em cinco pontos diferentes, bem como o aumento da temperatura média do tanque, o caudal mássico e a eficiência da placa. Apenas uma placa não foi suficiente para atender a demanda de temperatura mínima de água em todos os cenários, por isso, foi proposto um sistema com duas placas instaladas em série, dobrando a área total de irradiação solar e o número de tubos de aquecimento.

3. Fundamentação Teórica

Um coletor solar é um exemplo especial de permutador de calor que transforma energia da radiação solar em calor [3]. Ele se difere dos permutadores de calor tradicionais em vários aspectos. Enquanto equipamentos usuais realizam a troca térmica entre fluidos e a radiação é um fator negligenciado, no coletor solar, a transferência de energia acontece da fonte externa de energia para um fluido.

A conversão da energia da radiação solar em energia térmica acontece através de placas que recebem os raios solares e aquecem fluidos que passam por tubos localizados entre a placa. Os modelos de coletores mais comuns no mercado são de dois tipos: os coletores concentradores, que conseguem atingir altas temperaturas, e os coletores de placas planas, que são capazes de trocas moderadas. Os coletores de placas planas são mais simples e baratos.

Em estudos térmicos as principais propriedades levadas em consideração são: temperatura, pressão, massa e volume específico, calor específico, entalpia e entropia [30], elas também são levadas em consideração direta ou indiretamente nos estudos do coletor solar.

3.1. Transferência de Calor

O ramo da ciência da transferência de calor considera a troca de energia entre dois sistemas devido à diferença de temperaturas entre eles ou na troca de fases [31], a partir das equações de conservação de massa e energia, da segunda lei da termodinâmica e de três mecanismos que descrevem a transferência de energia entre corpos, sendo a Condução, Convecção e Radiação [32].

3.1.1. Condução

A condução é a transferência de calor num meio (podendo ser sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios a partir do contato direto, envolvendo a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas. Para um caso unidimensional, o fluxo de calor pode ser representado:

$$q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Onde,

q_{cond} = Fluxo de calor por condução, W

A = Área da seção transversal, m^2

k = Condutividade térmica, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

L = Comprimento, m

ΔT = Diferença de temperatura, K

3.1.2. Convecção

A Convecção é a transferência de calor entre fluidos, ou entre fluidos e sólidos, sendo o processo no qual a energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de condução de calor, armazenamento de energia e movimento do fluido, sendo o fluxo de calor representado pela equação:

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}A(T_s - T_{\infty}) \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Onde,

q_{conv} = Fluxo de calor por convecção, W

h_{conv} = Coeficiente de troca de calor por Convecção, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

A = Área superficial de contato, m^2

T_s = Temperatura superficial, ou de contato, K

T_{∞} = Temperatura no fluido, K

O coeficiente de troca de calor depende das características do fluido, velocidade de escoamento, geometria e acabamento superficial.

3.1.3. Radiação

A radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas ou de fótons, como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas.

A transferência de calor por radiação ocorre através do deslocamento de fótons de uma superfície para outra, sem a necessidade de um meio condutor entre as superfícies. Ao contrário da condução e convecção, a transferência de energia por radiação não requer um meio intermediário [33], a radiação é regida pela lei de Stefan-Boltzmann e pode ser definida como:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma AT^4 \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Onde,

q_{rad} = Taxa de transferência de calor por radiação, W

ε = Fator de emissividade (sempre >1), adimensional

σ = Constante de Stefan – Boltzmann ($5,669,10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

A = Área irradiada, m^2

3.2. Coletor Solar

Como descrito na seção 1.1 - Enquadramento, o coletor solar é uma tecnologia que utiliza a radiação solar para aquecer água, A Figura 3.1 exibe um coletor plano tradicional.

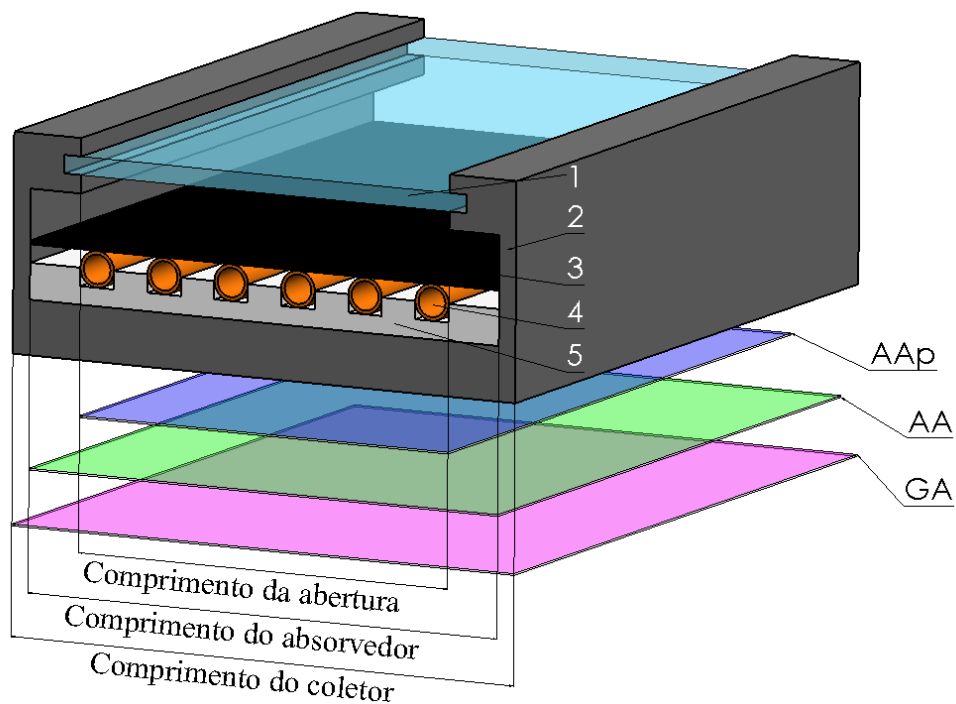


Figura 3.1 - Coletor solar plano tradicional. 1 - Cobertura transparente; 2 - Carcaça de metal; 3 - Placa absorvedora; 4 - Canais; 5 - Isolamento. [1]

É possível notar que existem três áreas diferentes representadas na Figura 3.1, GA é a área total do coletor, AA representa a área da placa absorvedora, ou seja, a área que receberá a irradiação útil e AA_p corresponde a área por onde passa o fluido e é a área onde efetivamente ocorrerá a troca de calor.

O coletor é posicionado de modo que a sua parte superior receba radiação solar, logo a parte inferior e as paredes laterais possuem a maior perda de calor e são nelas que normalmente são aplicados isolamentos térmicos.

3.3. Coeficiente Global de perdas de calor do coletor

O coletor pode perder calor pelas partes laterais, inferior e superior. As perdas pelas partes laterais e inferiores podem ser minimizadas pelo isolamento térmico, enquanto as perdas superiores ocorrem em duas etapas, entre a placa absorvedora e a cobertura, e entre a cobertura e o meio ambiente.

Para um coletor tradicional de coletor solar, como o mostrado na Figura 3.1, o coeficiente da perda de calor da parte superior do coletor é dado por:

$$U_F = \frac{P_P}{A_c(T_{pm} - T_a)} \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Onde,

U_F = Coeficiente de perda de calor superior, W/m²K

P_P = Potência térmica perdida pelo coletor, W

A_c = Área do coletor exposta à radiação, m²

T_{pm} = Temperatura média da placa absorvedora, K

T_a = Temperatura ambiente, K

A potência térmica perdida pelo coletor pode ser entendida como a diferença entre a potência térmica absorvida pelo coletor (P_{abs}) e a potência útil transferida ao fluido (P_u).

$$P_P = P_{abs} - P_u \quad \text{Eq. (3.5)}$$

$$P_{abs} = \alpha_p G A_c \quad \text{Eq. (3.6)}$$

Onde,

α_p = Absortividade da placa, adimensional

G = Irradiação solar, W/m²

$$P_u = \dot{m} C_p \Delta T \quad \text{Eq. (3.7)}$$

Onde,

\dot{m} = Caudal mássico, kg/s

C_p = Calor específico, KJ/KgK

ΔT = Diferença de temperaturas de entrada e saídas, K

A energia perdida pela parte inferior do coletor é aproximadamente:

$$U_i = \frac{k}{L_i} \quad \text{Eq. (3.8)}$$

Onde,

k = Condutividade térmica, W/(m.K)

L_i = Espessura da camada inferior do coletor, m

Já a energia perdida pelas paredes laterais do coletor é mais complexa de ser calculada e em coletores bem projetados, essa perda deve ser pequena a ponto de poder ser desprezada. Assumindo o fluxo de calor lateral unidimensional ao redor do perímetro do sistema, as perdas laterais devem poder ser calculadas com referência a área do coletor exposta à radiação:

$$U_l = \frac{(U/A)_{perímetro}}{A_c} \quad \text{Eq. (3.9)}$$

Onde,

$(U/A)_{perímetro}$ = Coeficiente de perda do perímetro, W/K

Por fim, assumindo que a temperatura ambiente é a mesma ao redor do coletor, Coeficiente Global de perdas de calor do coletor (U_L) pode ser calculado:

$$U_L = U_F + U_i + U_l \quad \text{Eq. (3.10)}$$

3.4. Efeito Termossifão

O efeito Termossifão é um método de troca de calor passiva, baseada na convecção natural, onde o fluido se move sem a necessidade de uma bomba. Esse efeito é utilizado principalmente para circular água em sistemas que utilizam energia solar ou para ajudar na climatização de ambientes, através da circulação do ar.

Em coletores solares, a radiação incidente sobre a placa aquece a água em seu interior. A água aquecida expande e diminui sua massa específica. Por ter uma massa específica menor, a

água aquecida se desloca para o tanque (localizado na parte superior do circuito), enquanto a água fria, e mais densa, desce para o coletor. Esse fenômeno é denominado circulação por convecção natural, e essa circulação irá acontecer enquanto houver radiação incidindo na placa absorvedora.

3.5. Desempenho do coletor solar

Em regime permanente, o desempenho de um coletor solar é descrito por um equilíbrio térmico, que equivale à distribuição da energia solar incidente em ganho de energia útil, expressa como a proporção do fluxo solar incidente na área de abertura do coletor, menos as perdas térmicas. Em outras palavras, é o quanto o coletor consegue aquecer a água.

A energia útil de saída de um coletor pode ser calculada pela seguinte Equação:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad \text{Eq. (3.11)}$$

Onde,

F_R = Fator de remoção do coletor, K^{-1}

Q_u = Ganho de energia útil, W

S = Radiação absorvida, W/m^2

U_L = Coeficiente de transferência de calor, W/m^2K

T_i = Temperatura de entrada, K

O desenvolvimento da Equação 3.11 pode ser encontrado em detalhes no livro *Solar Engineering of thermal processes* [3].

A potência térmica (\dot{Q}_u) na saída do coletor é equivalente à potência útil transferida ao fluido (P_u), calculado na Equação 3.7, logo:

$$\dot{Q}_u = P_u \quad \text{Eq. (3.12)}$$

A eficiência do coletor pode ser descrita como a razão do ganho útil em um período específico de tempo pela energia solar incidente do mesmo período.

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G dt} \quad \text{Eq. (3.13)}$$

Onde,

η = Eficiência térmica do coletor, adimensional

A_c = Área exposta à radiação solar, m²

G = Radiação solar global, W/m²

3.6. Estratificação

A estratificação da água no reservatório também ocorre devido à diferença de massa específica do fluido, no qual o fluido menos denso e mais quente vai para a parte superior e o fluido mais denso e mais frio se move para a parte inferior. É importante melhorar a estratificação do reservatório, pois a temperatura da água fornecida na entrada do coletor será menor na medida em que o gradiente de temperatura no interior do reservatório aumenta.

De acordo com Siqueira [34], o caudal volumétrico na entrada e na saída do reservatório não pode ultrapassar os 40 L/h, pois a estratificação ocorre enquanto não houver movimentação de água em seu interior.

4. Materiais e Métodos

O presente trabalho consistiu na elaboração de dois modelos de coletores solares flexíveis de baixo custo com circulação natural. Foram efetuados tantos estudos numéricos como de fabricação visando reduzir os custos de produção e mantendo o desempenho. Os modelos foram simulados no software *ANSYS/FluentTM* 18.2 em dois sistemas cada. Cada sistema consiste nas placas de aquecimento conectadas a tubagens e um reservatório, a diferença entre os sistemas é que um possui uma placa aquecedora e o outro possui duas placas ligadas em paralelo e ambos consideram o consumo de água nulo. Já para o segundo coletor foi feita mais uma simulação, considerando apenas a entrada e saída de água na placa de aquecimento.

Em todas as simulações, foram consideradas as condições climáticas do inverno no Porto e do inverno em Fortaleza, essas condições foram escolhidas por serem as condições mais extremas analisadas no trabalho anterior.

4.1. Primeiro modelo de coletor

O primeiro modelo foi feito em parceria com a empresa *FactoryPlay®* e desenvolvido com base no coletor anteriormente projetado pelo Douglas [1]. Foi feita a adaptação da placa de aquecimento para medidas que a empresa conseguisse fabricar.

4.1.1. Primeiro coletor solar

O coletor solar é constituído por três partes: a placa absorvedora, local que possui os canais de aquecimento; a cobertura transparente cuja função é permitir que ocorra o efeito estufa e aumentar a temperatura na superfície da placa; a última é uma capa posicionada na parte debaixo do coletor, que tem a função de acomodar a camada isolante, responsável por diminuir as perdas de calor do sistema. A Figura 4.1 representa o primeiro protótipo do coletor:

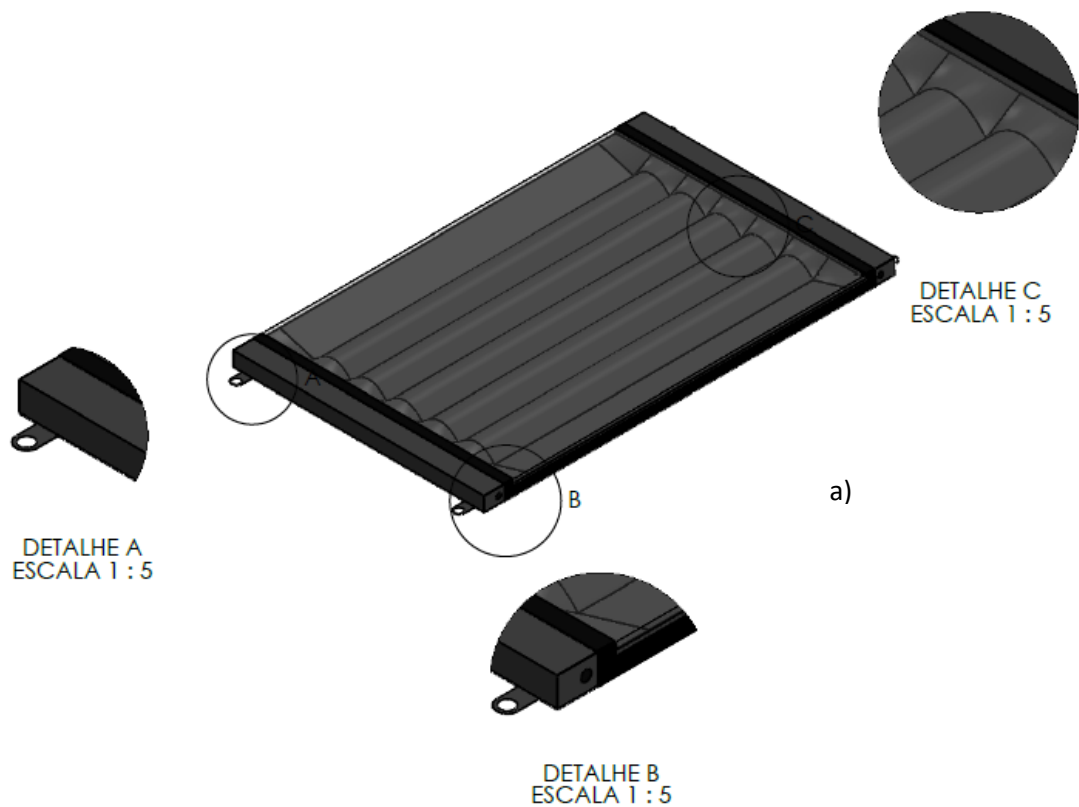


Figura 4.1 - Coletor em vista isométrica e algumas vistas em detalhe

O coletor é todo ele fabricado em filme de Poliuretano (PU), a placa e capa são compostas pela lona preta N586 e a cobertura transparente é produzida com tela cristal de filme de Poliuretano. Esses materiais foram selecionados devido ao seu preço acessível e sua resistência a raios UV, proporcionando uma maior vida útil.

Para tornar a manutenção e substituição dos componentes mais fáceis, foi aplicado Velcro no perímetro das três peças, garantindo a sua ligação. Na placa absorvedora foi aplicado Velcro fêmea enquanto na cobertura superior e placa inferior foi aplicado Velcro macho.

A espessura do isolamento inferior foi aproximada à espessura indicada Cristofari et al. [35]. Depois de uma pesquisa no mercado, selecionou-se uma camada de borracha EPDM com 19 mm de espessura da marca Armacell®, modelo HT/Armaflex. Esse material possui características de células fechadas com alta flexibilidade, funciona em temperaturas entre -50°C e 130°C e apresenta uma condutibilidade térmica de $0,045\text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$ para uma temperatura de 40°C [36].

Foram feitos quatro furos nas laterais dos canais onde foram instalados tubos roscados que permitem ligar o coletor em série ou paralelo com outros coletores, e servem para ligar os canais de entrada e saída de água com o reservatório. Os tubos roscados são presos e vedados

na placa através da aplicação de cola vedante. Foram utilizados tubos roscados para tubo de aço Inox com 15 mm de diâmetro, havendo a flexibilidade em alterar essas medidas, consoante às necessidades do projeto.

4.1.1.1. Características geométricas

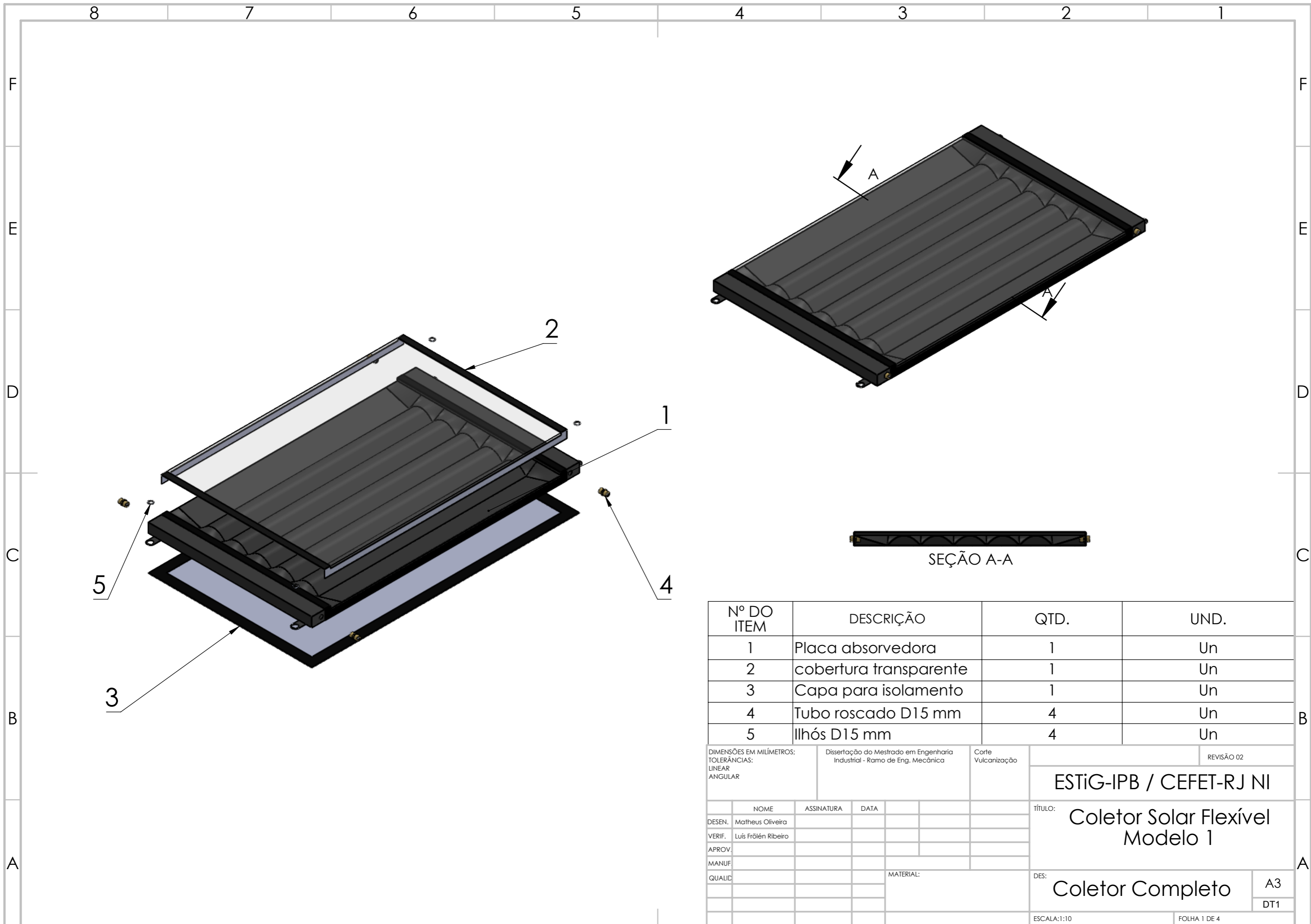
O primeiro modelo de coletor solar possui sete canais de aquecimento de água, com 900 mm de comprimento, com secção transversal com geometria em arco de círculo, com 100 mm de largura e 30 mm de altura. Um canal de distribuição e coleta em cada extremidade com 80 mm de largura e 40 mm de altura, por fim, um espaçamento de 50 mm entre os canais de aquecimento e os de coleta/distribuição para viabilizar a vulcanização. Nesse modelo, cabem 1,8 litros de água em cada canal de aquecimento e o coletor comporta um máximo de 18 litros.

A diferença de 10 mm entre a altura dos canais de aquecimento e os canais de coleta/distribuição é para que haja ar entre a cobertura e a placa, proporcionando o efeito estufa.

Em relação às medidas externas, o coletor possui 1160,0 mm de comprimento e 708,4 mm de largura. Esses valores foram escolhidos para manter a proporção áurea, sendo visualmente mais atraente ao consumidor e a placa possui 0,73 m² de área irradiada. Também foram projetadas quatro tiras retangulares com ilhós nas suas extremidades nas bordas da placa absorvedora, que têm a função de permitir a fixação do coletor.

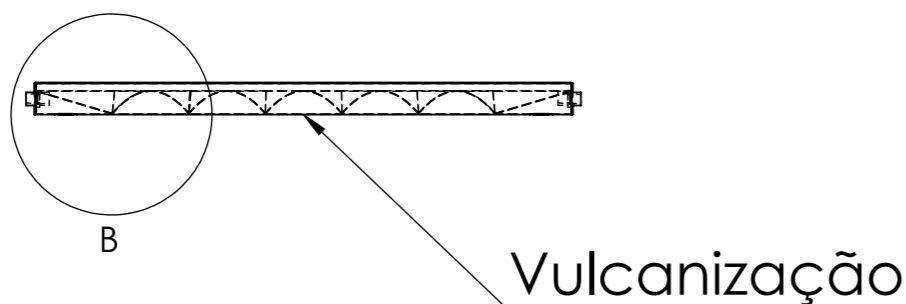
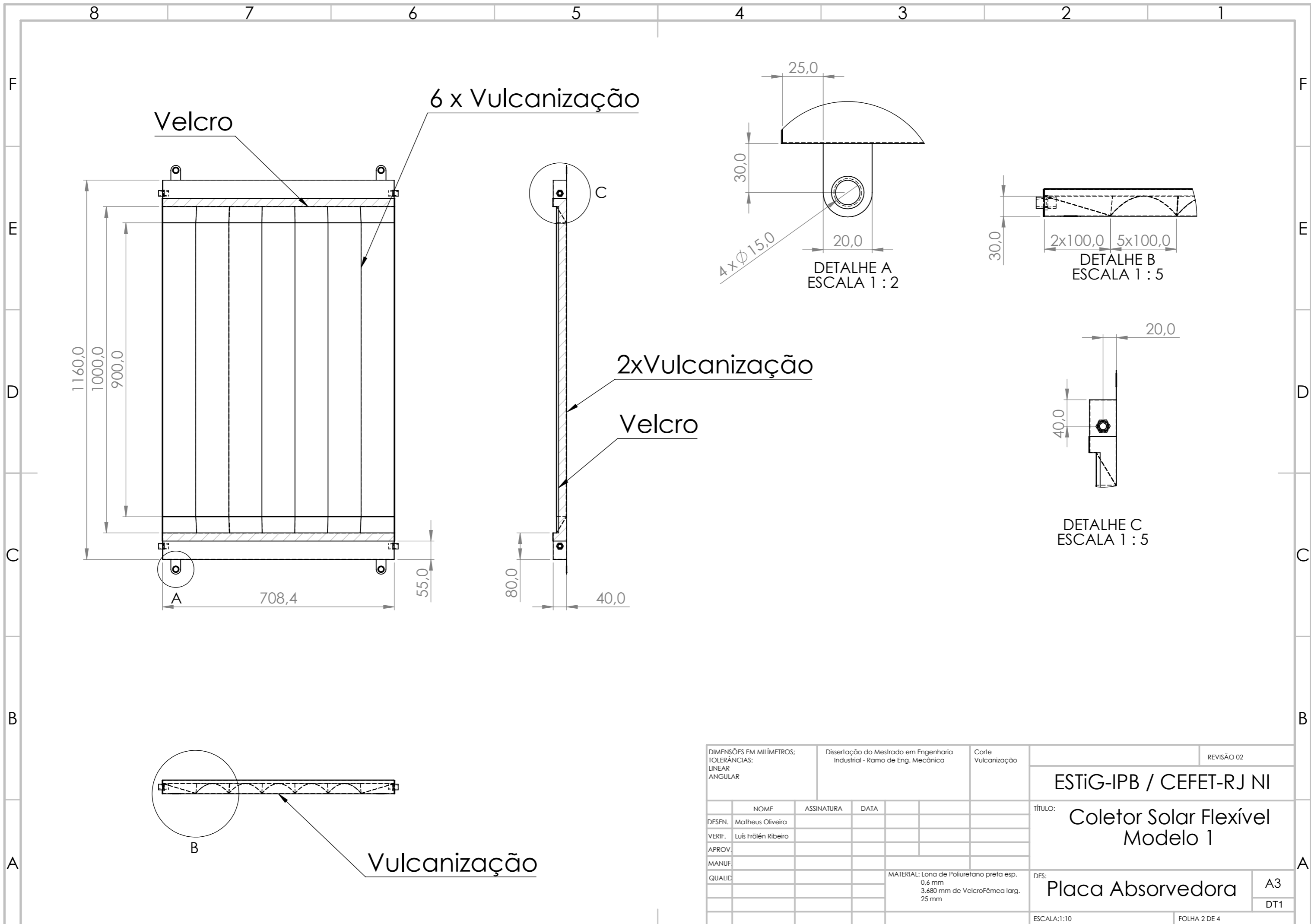
A seguir se encontram os desenhos técnicos DT1 do coletor, na primeira folha está a montagem do coletor, com a placa absorvedora (1), por onde passa o fluido que é aquecido. A cobertura transparente (2), cuja função é proporcionar o efeito estufa e é ligada na placa absorvedora com o uso de Velcro, a capa para isolamento (3) também é ligada na placa com Velcro, formando uma espécie de envelope que irá abrigar a camada de material isolante. Os quatro tubos roscados (4) funcionam como conexão do coletor com outros coletores ou com sistemas de tubagens e reservatórios. Também são adicionados quatro ilhós (5) nas tiras das bordas da placa para fortalecer a região de fixação.

A segunda folha exhibe as projeções ortogonais e vistas detalhadas da placa absorvedora, bem como suas medidas e materiais utilizados. A terceira folha possui as mesmas informações da cobertura superior e na quarta estão as vistas e detalhes da capa para isolamento.

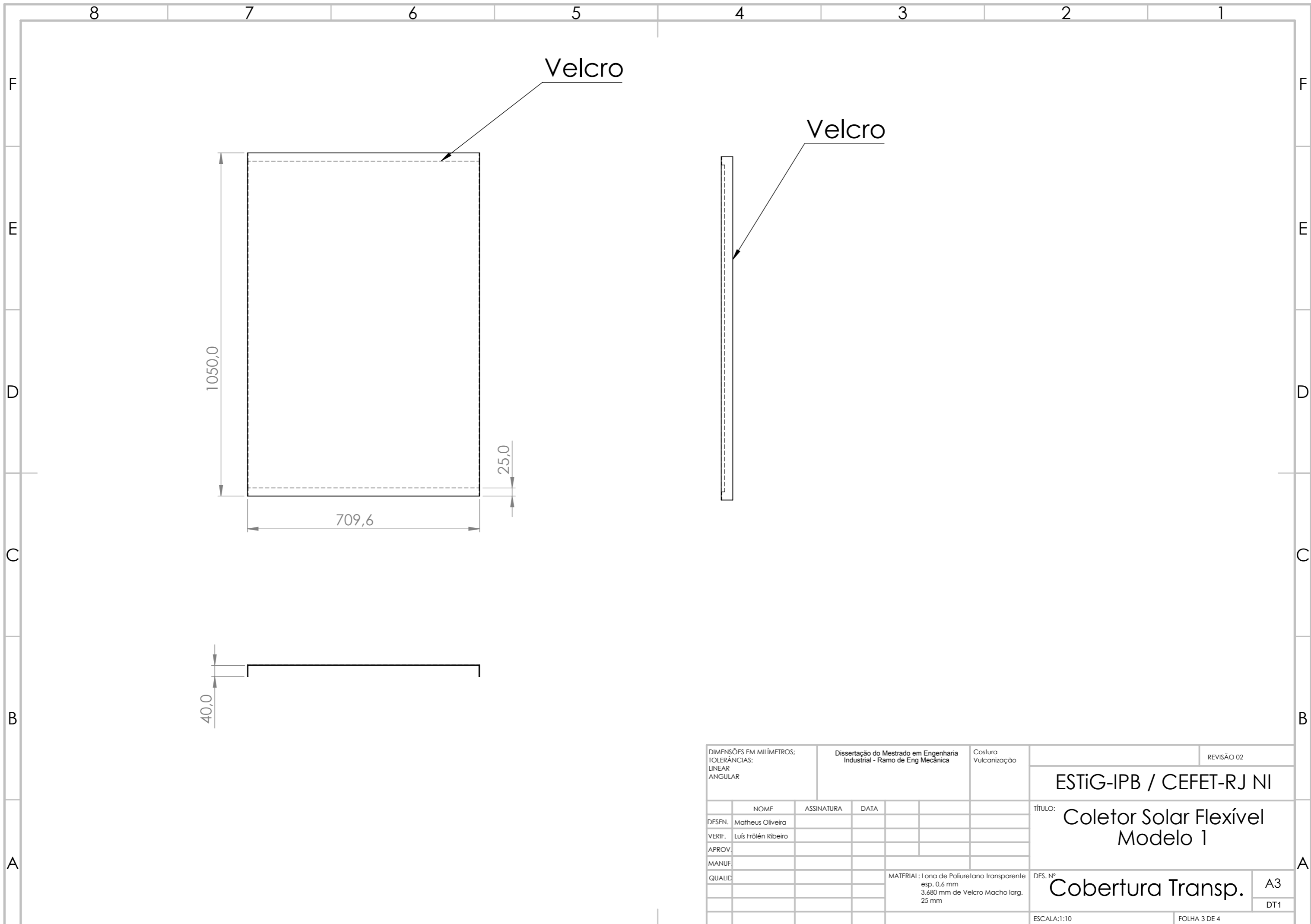


Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	UND.
1	Placa absorvedora	1	Un
2	cobertura transparente	1	Un
3	Capa para isolamento	1	Un
4	Tubo roscado D15 mm	4	Un
5	Ilhós D15 mm	4	Un

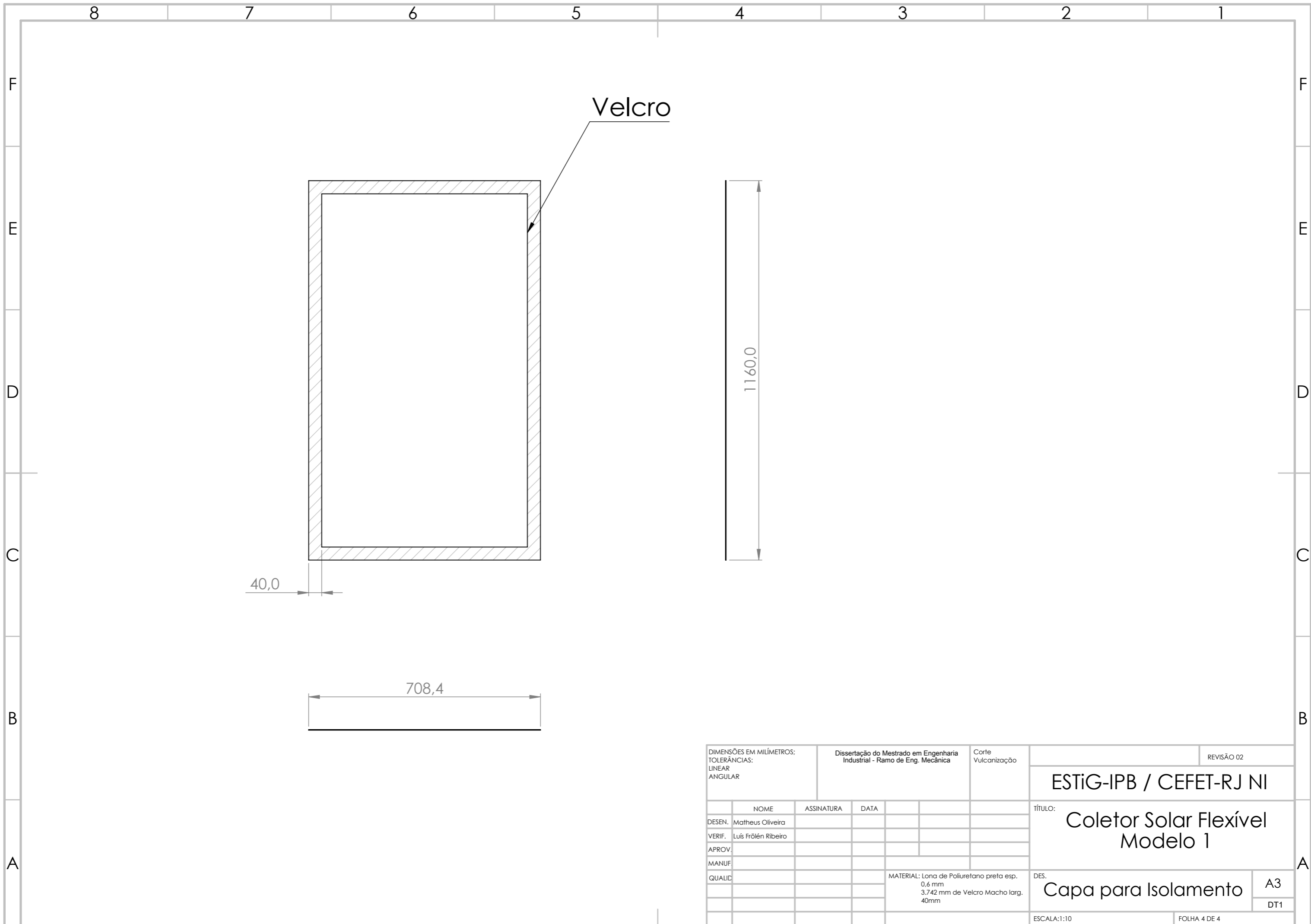
DIMENSÕES EM MILÍMETROS: TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 02	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1	
						DES: Coletor Completo	
						A3 DT1	
						ESCALA:1:10	
						FOLHA 1 DE 4	



DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 02	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1	
						DES: Placa Absorvedora	
				MATERIAL: Lona de Poliuretano preta esp. 0,6 mm 3.680 mm de VelcroFêmea larg. 25 mm		A3 DT1	
				ESCALA:1:10		FOLHA 2 DE 4	



DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng Mecânica		Costura Vulcanização	REVISÃO 02
					ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI
					TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1
					DES. Nº Cobertura Transp.
					A3
					DT1
					ESCALA:1:10
					FOLHA 3 DE 4



Velcro

40,0

708,4

1160,0

DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 02	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1	
						DES. Capa para Isolamento	
						A3	
						DT1	
						ESCALA:1:10	
						FOLHA 4 DE 4	

4.1.2. Reservatório e tubagens

Segundo a *World Health Organization* [37] uma pessoa consome entre 50 e 100 litros de água por dia, se considerar o consumo médio de 75 litros por dia, um tanque com 150 litros é suficiente para abastecer uma residência onde vivem duas pessoas.

O reservatório de água foi baseado no sistema proposto por Jurado [38]. O tanque é formado por dois tambores de plástico posicionados concêntricos, o interno de 150 litros e o externo de 250 litros. Para preencher o espaço entre os tambores foi inserido Poliestireno expandido (EPS) como material isolante. Na Figura 4.2 é possível visualizar o sistema.

Para as tubagens será utilizado tubo de PVC multicamadas com isolamento de Poliestireno Expandido (EPS), fixados pelos próprios tubos roscados. Esse material foi escolhido pelo seu preço acessível e por ser amplamente comercializado.

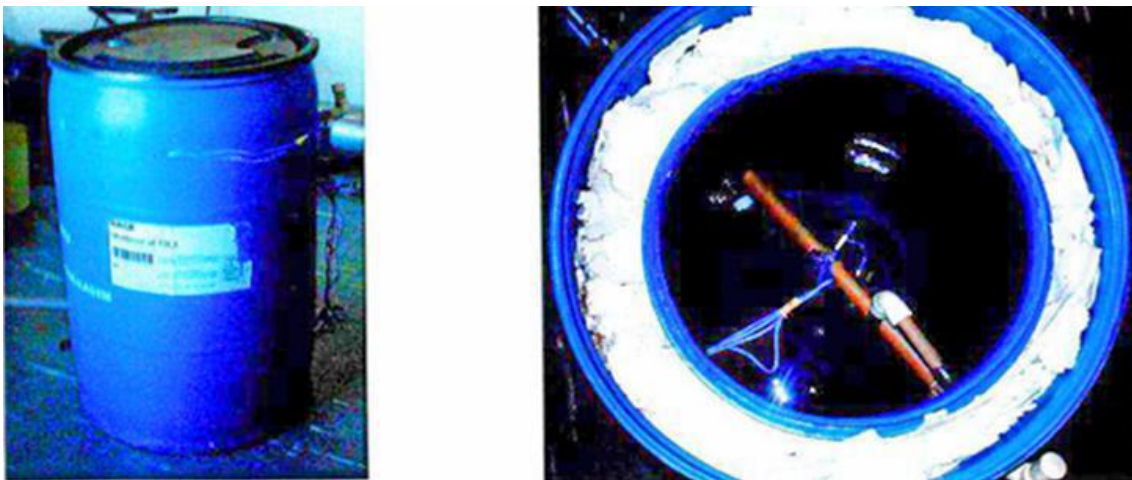


Figura 4.2 - Reservatório proposto por Jurado [38]

4.1.3. Sistema Simulado

Foi feito um modelo numérico do primeiro protótipo para avaliar sua eficiência. O modelo segue os mesmos parâmetros utilizados por Douglas [1], alterando a placa absorvedora pela desenvolvida nesse projeto, com diferenças na geometria dos canais de aquecimento, área de irradiação solar e volume de água em seu interior.

O sistema completo consiste na placa absorvedora, tubos de conexão e um reservatório cilíndrico, como representado na Figura 4.3.

Para coletar os dados das simulações, foram inseridos dois pontos no modelo. O ponto P1 está localizado na saída do coletor, medindo a temperatura e caudal mássico. O ponto P2 está

na localizado na região central do reservatório, a cerca de cinco centímetros da superfície, onde estaria localizado o tubo para saída da água para consumo, a Figura 4.3 mostra o sistema simulado com os pontos:

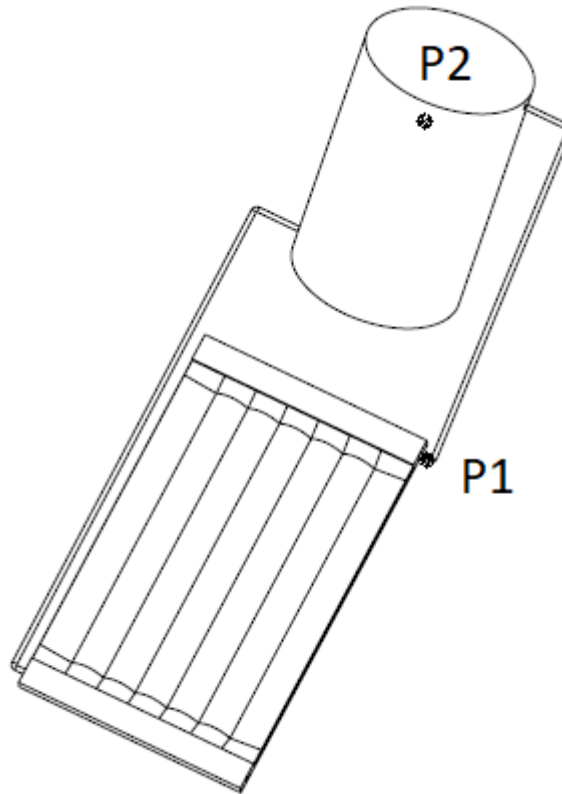


Figura 4.3 - Sistema para ser simulado

A modelação do coletor solar foi feita no *software SolidWorks* 2018 e as simulações numéricas foram realizadas no *software ANSYS/FluentTM 18.2*.

Para reduzir o tempo e a complexidade do processamento, foi considerada apenas a placa dos canais de aquecimento ligada a um reservatório cilíndrico simples como modelo numérico, além disso, outras simplificações foram adotadas:

- Fluido Incompressível;
- escoamento laminar;
- Perda de carga na tubagem desprezada;
- Isolamento inferior, paredes laterais, tubulações e tanque adiabáticos;
- Fluxo de calor uniforme sobre toda superfície superior da placa;
- Radiações direta e difusa transformadas em fluxo de calor global.

A norma europeia EN 12975 [39] diz que os testes devem ser feitos levando em consideração um fluxo de ar paralelo à superfície superior do coletor solar de $3 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$, entretanto foi adotado um fluxo de ar paralelo de 0 m/s para simular o efeito estufa como se houvesse a cobertura. Além disso, como as paredes laterais são consideradas adiabáticas, o vento não as influencia.

4.1.4. Ângulo de inclinação e Geometria

A inclinação dos coletores não irá variar com o passar dos dias. Ela foi definida baseada nos estudos de Patkó [29], que simplifica os cálculos para determinação dos ângulos ótimos de inclinação da placa. O Azimute também se baseia no mesmo estudo, o qual diz que, quando situado no hemisfério Sul, a placa deve ser posicionada totalmente virada para o Norte e vice-versa.

A Tabela a seguir mostra as latitudes e angulações para Porto e Fortaleza:

Tabela 4.1 – Latitude e Ângulo de inclinação da placa

Cidade	Latitude (ϕ)	Ângulo de inclinação da placa (β)
Porto	41,2	41,2°
Fortaleza	-3,7	27,2°

A geometria foi exportada do *SolidWorks* para o *Ansys* e editada no *Desgin Modeler*, que é um *software* de CAD dentro do *Ansys*. A diferença entre as simulações foi o número de placas e a inclinação em cada cidade. No *Desgin Modeler* a superfície superior da placa foi selecionada e nomeada como um objeto a parte, pois esta é a parte que será irradiada e a condição de contorno nela será diferente do resto do coletor.

Com isso o coletor foi dividido em duas zonas: superfície aquecida e isolamento. O restante do modelo manteve suas zonas semelhantes às peças, tendo o reservatório e as tubagens (ida e retorno). A figura 4.4 exhibe esse modelo numérico:

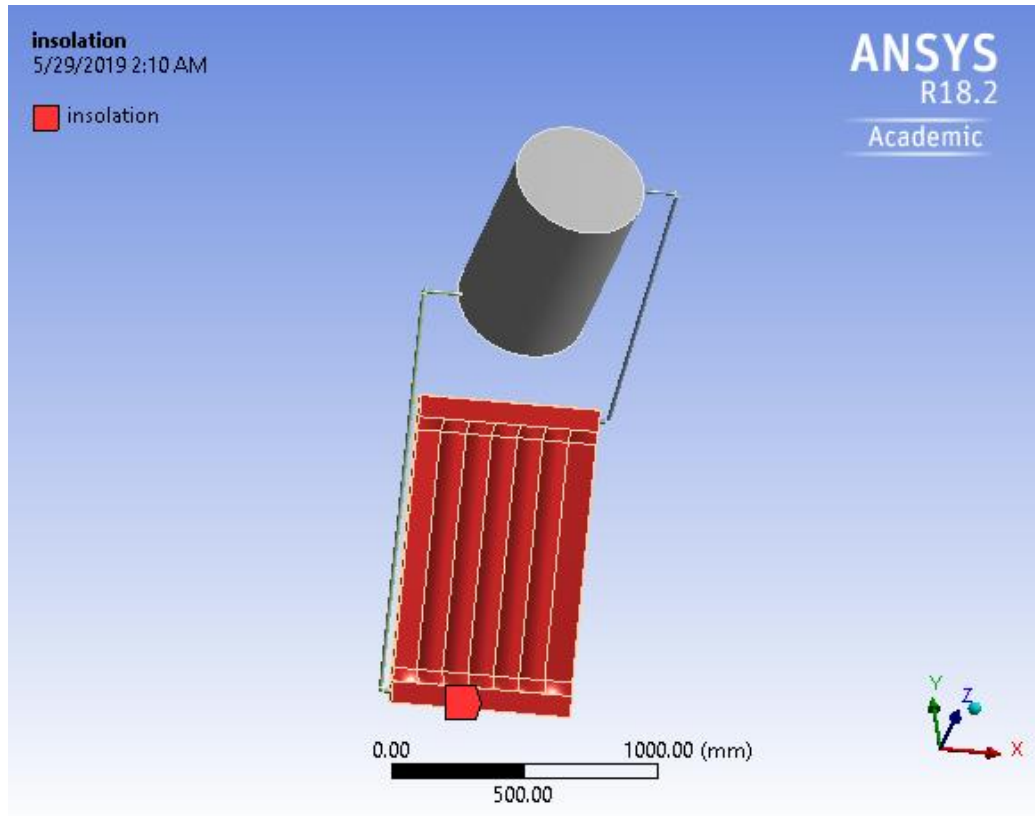


Figura 4.4 - Modelo numérico do sistema completo

4.1.5. Malha

A malha tetraédrica foi gerada automaticamente, utilizando a função de tamanho “*curvature*”. Seu formato de exportação foi “*standart*” e com Ordem de elemento linear. Os valores máximos e mínimos se mantiveram no valor padrão. É possível ver a distribuição dos nós na Figura 4.5:

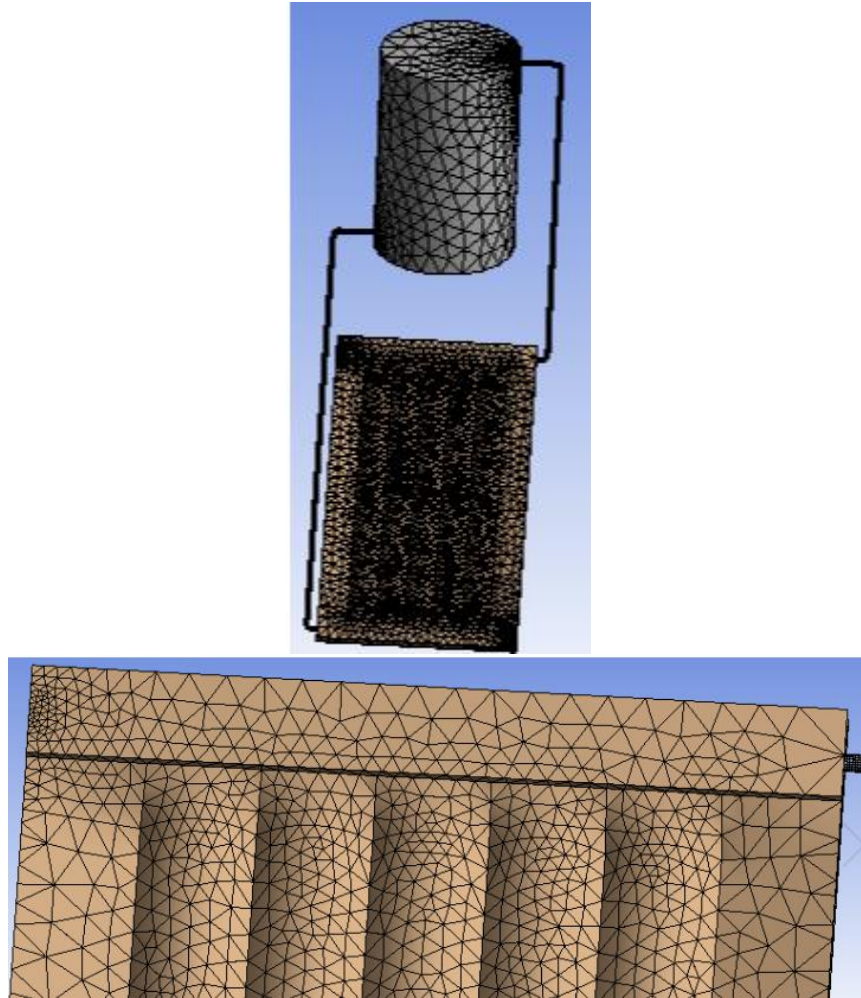


Figura 4.5 - Malha com a função “Curvature”

A tabela a seguir representa a quantidade de nós e elementos de cada simulação:

Tabela 4.2 - Nós e Elementos com a função “Curvature”

Cidade	Nós	Elementos
Porto – 1 placa	73542	106037
Porto – 2 placas	129170	184702
Fortaleza – 1 placa	97020	128682
Fortaleza – 2 placas	176126	229992

4.1.6. Configuração do *Ansys Fluent*

A configuração do *Fluent* foi feita baseada na tese de doutoramento de Freegah [40] e na tese de mestrado do Douglas [1]. O *solver* do sistema foi selecionado como *pressure-based*, pois requer menos memória e é aplicável para um escoamento de fluido incompressível com

baixa velocidade. O comportamento do sistema foi definido como transiente e foi incluída a força peso do fluido. O fluido tem escoamento laminar e a função de energia foi configurada como “on”.

O fluido de trabalho é a água, ela teve sua massa volúmica alterada de constante para *Boussinesq* com seu valor mantido de $998,2 \text{ kg/m}^3$ e coeficiente de dilatação térmica de $0,0002061 \text{ K}^{-1}$. Já nas suas condições de operações, a temperatura inicial foi definida como 293 K e foi ativada a opção de densidade de operação com o valor de 0 kg/m^3 , assim é possível incluir o efeito hidrostático e o fluido parte do repouso em seu estado inicial. Os valores de referências foram apurados a partir do reservatório e o método de solução foi definido da seguinte maneira:

- *Scheme: SIMPLEC*
- *Skewness correction: 0*
- *Gradient: Least Squares Cell Based*
- *Pressure: Body Force Weighted*
- *Momentum: Second Order Upwind*
- *Energy: Second Order Upwind*
- *Transient formulation: Second Order Implicit*

O esquema SIMPLEC foi escolhido por proporcionar resultados com menor tempo de processamento, visto que a simulação envolve um simples escoamento laminar. A correção de assimetria configurada para zero já é um padrão do sistema. O método de solução do gradiente por mínimos quadrados baseado em células é menos estável do que os baseados em nós, entretanto ambos entregam resultados precisos [40], este método considera linear a variação entre o centroide de uma célula e outra. O método de solução da pressão foi definido com o efeito da força do peso do corpo para incluir o efeito Termossifão a partir do efeito das forças de impulsão. Os métodos de discretização numérica para as soluções da quantidade de movimento, energia e formulação transiente foram escolhidos os de segunda ordem, pois suas aproximações utilizam uma reconstrução linear multidimensional nas faces das células através da expansão da série de Taylor e, conseqüentemente, retornam resultados mais precisos.

No monitoramento do erro residual, o critério de convergência foi alterado para relativo, pois como esta é uma análise em regime transiente, esse critério compara as variáveis em relação ao passo anterior, ao invés de comparar com o começo da simulação.

Cada caso simulado possui um tempo de exposição à luz solar diferente, portanto, as simulações em cidades diferentes terão uma quantidade de passos diferentes. O tempo de irradiação no inverno do Porto é de 11 horas e 15 minutos enquanto no inverno em Fortaleza esse tempo é de 12 horas. Ao dividir esse período de tempo em passos de 30 segundos, tem-se 1350 passos para as simulações no Porto e 1440 passos para Fortaleza.

Devido a falta de informação e para comparar os resultados com os obtidos no estudo prévio, a simulação foi feita utilizando as propriedades do PVC plasticizado retiradas da base de dados do software *SolidWorks* ao invés das propriedades do filme de PU. Essas propriedades estão indicadas na tabela a seguir:

Tabela 4.3 - Propriedades PVC

Lona PVC	
Massa específica [kg/m ³]	1.290
Calor específico [J/kgK]	1.600
Condutividade térmica [W/mK]	0,16

4.1.7. Condições de contorno

O reservatório e as tubagens foram considerados como volumes de água com superfícies adiabáticas e espessura de parede zero. O isolamento (parte inferior e paredes laterais do coletor) também foi considerado adiabático, com espessura e parede igual a 0,6 mm e seu material foi selecionado como lona PVC.

Todas as regiões de contacto entre as peças foram deixadas com a configuração padrão.

A superfície aquecida possui uma parede de 0,6 mm de espessura e seu material foi definido como PVC. O calor incidente foi inserido através de uma *User Defined Functions* (UDF), que são funções definidas pelo utilizador. Neste caso as funções utilizadas representam a variação da radiação solar sobre a placa através do dia.

4.1.8. Fluxo de Calor

O fluxo de calor sobre o coletor solar varia de acordo com a época do ano, e varia também conforme as horas do dia. Os perfis de variação do fluxo de calor no Porto foram retirados da plataforma PVgis e do *software* PVsyst 6.7.4 para Fortaleza. Ambas as fontes permitem o

utilizador inserir o ângulo da placa e o período do ano e estimar a radiação solar já no plano inclinado.

Em sua tese, Douglas [1] gerou funções a partir dos perfis de variação do fluxo solar ao longo do dia. As equações 4.1 e 4.2 são respectivamente inseridas nas simulações do Porto e Fortaleza.

$$G(t) = (2.6986e - 32) * t^8 - (4.4402e - 27) * t^7 + (3.0647e - 22) * t^6 - (1.151e - 17) * t^5 + (2.5503e - 13) * t^4 - (3.3739e - 09) * t^3 + (2.3755e - 05) * t^2 - 0.024644 * t + 21.139 \quad \text{Eq. (4.1)}$$

$$G(t) = (9.4502e - 16) * t^4 - (8.1649e - 11) * t^3 - (2.558e - 08) * t^2 + (0.077294) * t - 23.816 \quad \text{Eq. (4.2)}$$

A Figura 4.6 mostra as curvas geradas por essas funções, que representam o fluxo de calor incidindo sobre o coletor nos dois casos:

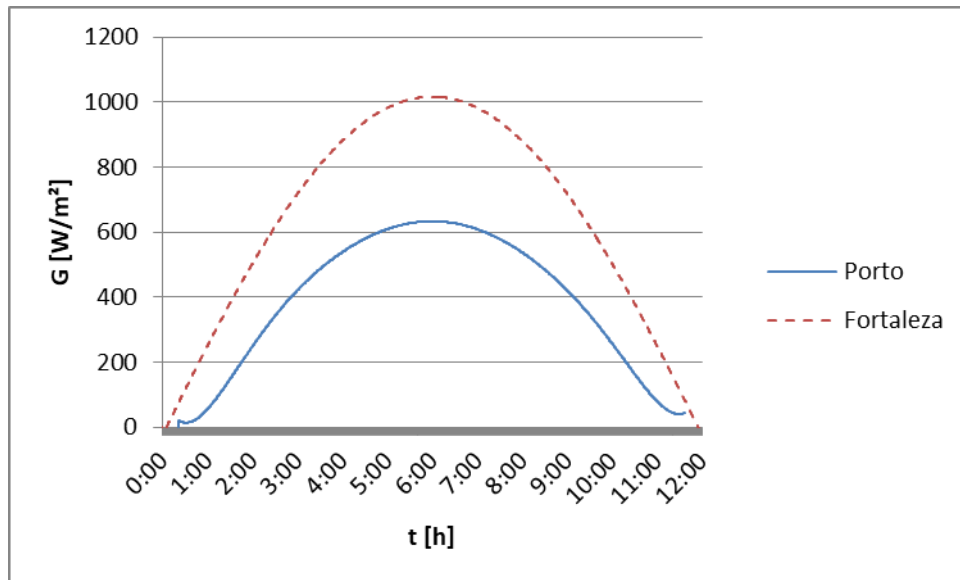


Figura 4.6 - Fluxos de calor em cada cidade sobre o coletor

4.1.9. Fabricação do primeiro Protótipo

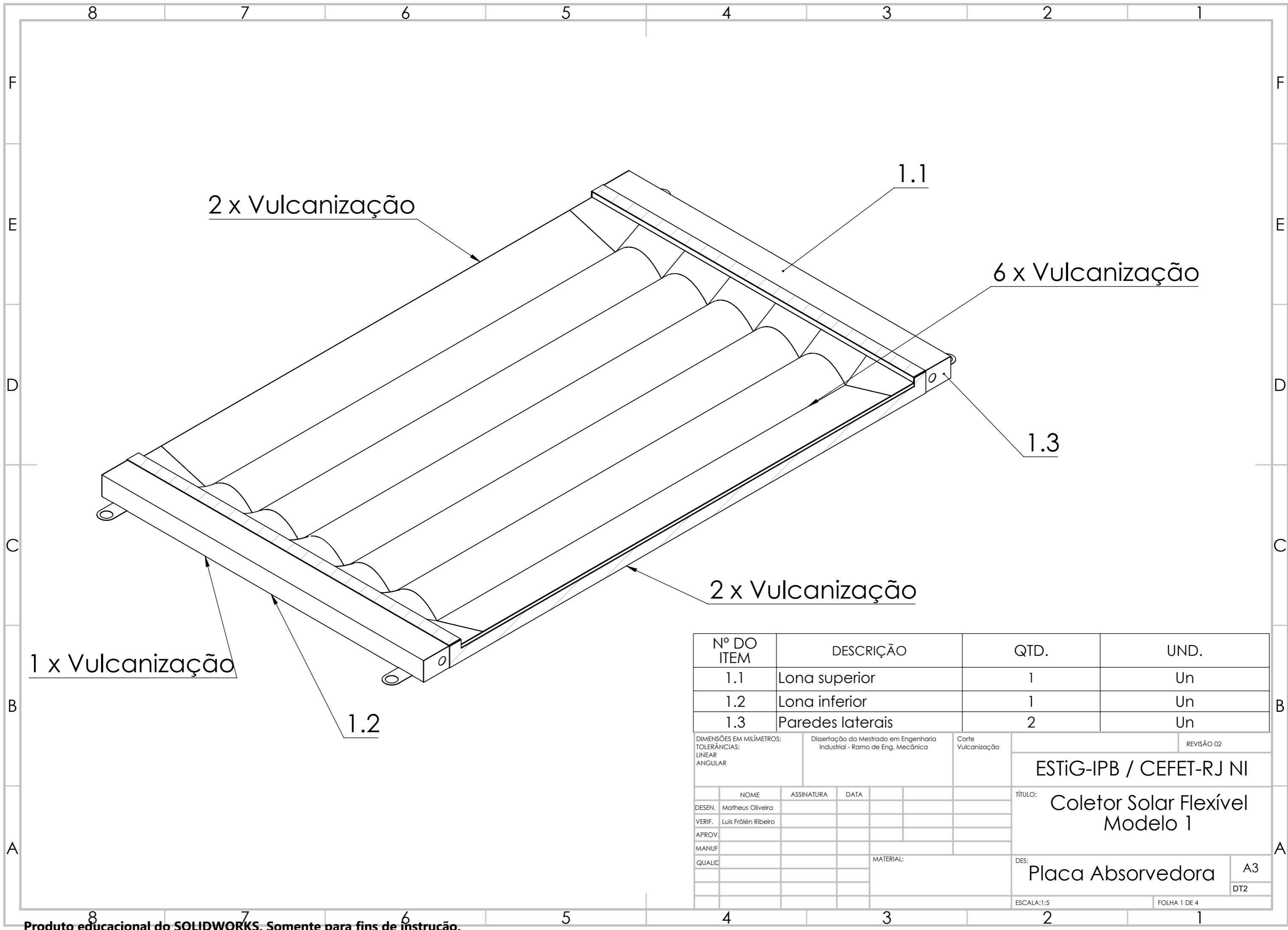
Um modelo demonstrativo foi fabricado com costura, para identificar possíveis oportunidades de melhoria relativas ao seu processo de fabrico.

A produção ocorre em três etapas: planificação; corte e marcação; costura.

Antes de iniciar a produção, é preciso ter definido um modelo em 3D, que será planificado no início da produção. A seguir se encontram os desenhos DT2 de fabricação da Placa Absorvedora, que servem como modelo 3D e contém indicações do seu processo de fabrico.

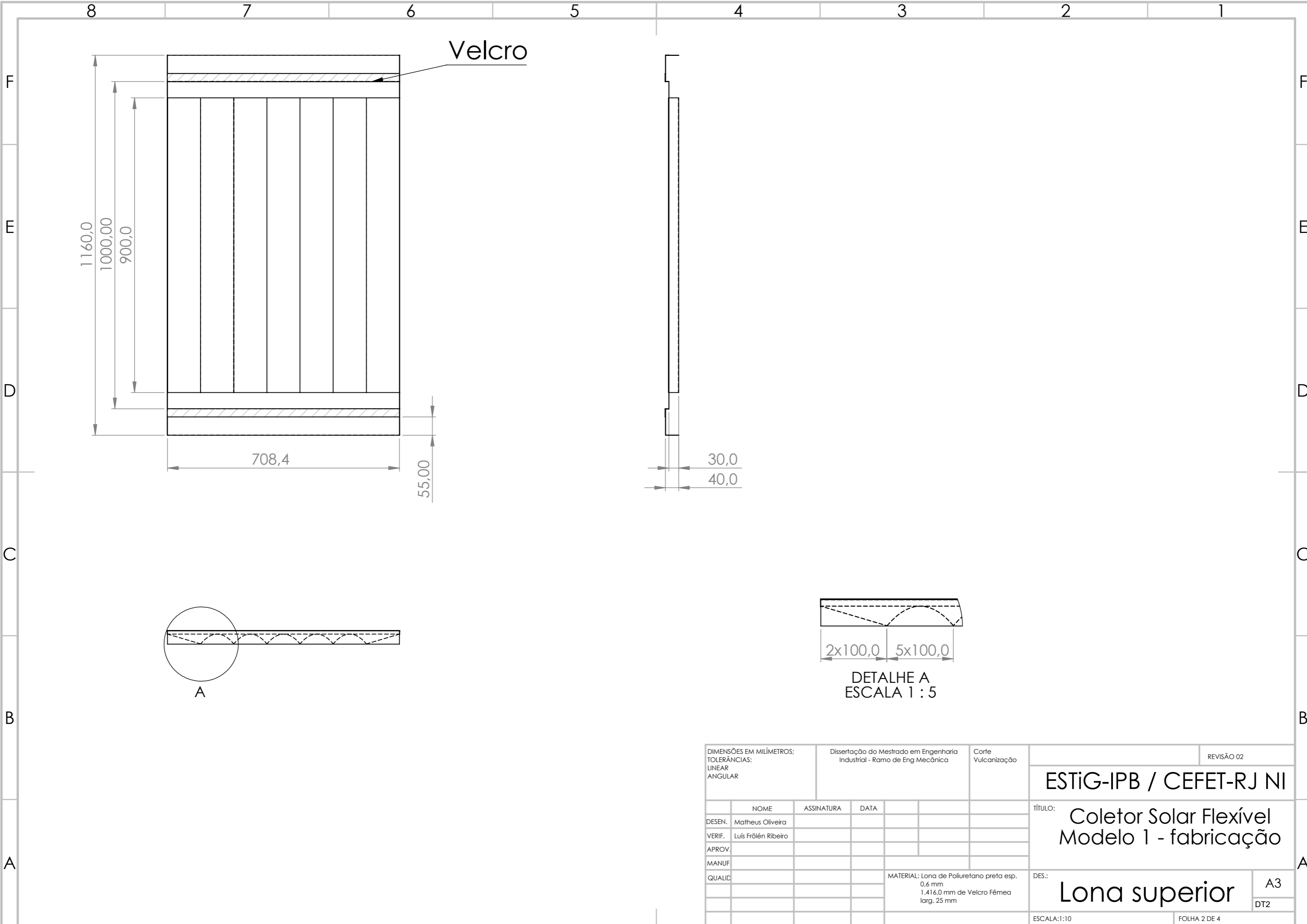
Como exibido na primeira folha do desenho DT2, a placa absorvedora é formada por quatro peças: uma lona superior (1), uma lona inferior (2) e duas paredes laterais (3). Também são exibidos os locais de união entre as peças, onde deverá ser vulcanizado.

A segunda folha exhibe as medidas da lona superior, incluindo as medidas que os canais devem ter para a passagem de água e os locais de aplicação de Velcro. A terceira e quarta folhas contém as mesmas informações, para a lona inferior e a parede lateral. Um detalhe é que as duas paredes laterais são idênticas, portanto o mesmo desenho serve para ambas.

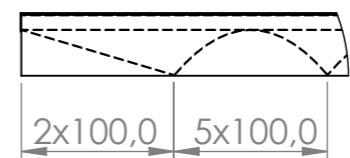


Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	UND.
1.1	Lona superior	1	Un
1.2	Lona inferior	1	Un
1.3	Paredes laterais	2	Un

DIMENSÕES EM MILÍMETROS: TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização	REVISÃO 02																										
<table border="1"> <tr> <td>DESEN.</td> <td>Matheus Oliveira</td> <td>ASSINATURA</td> <td>DATA</td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>Luís Frólén Ribeiro</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROV.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MANUF.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>QUALID.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					DESEN.	Matheus Oliveira	ASSINATURA	DATA		VERIF.	Luís Frólén Ribeiro				APROV.					MANUF.					QUALID.					ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
					DESEN.	Matheus Oliveira	ASSINATURA	DATA																							
					VERIF.	Luís Frólén Ribeiro																									
					APROV.																										
					MANUF.																										
QUALID.																															
					TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1																										
					DES: Placa Absorvedora																										
					A3 DT2																										

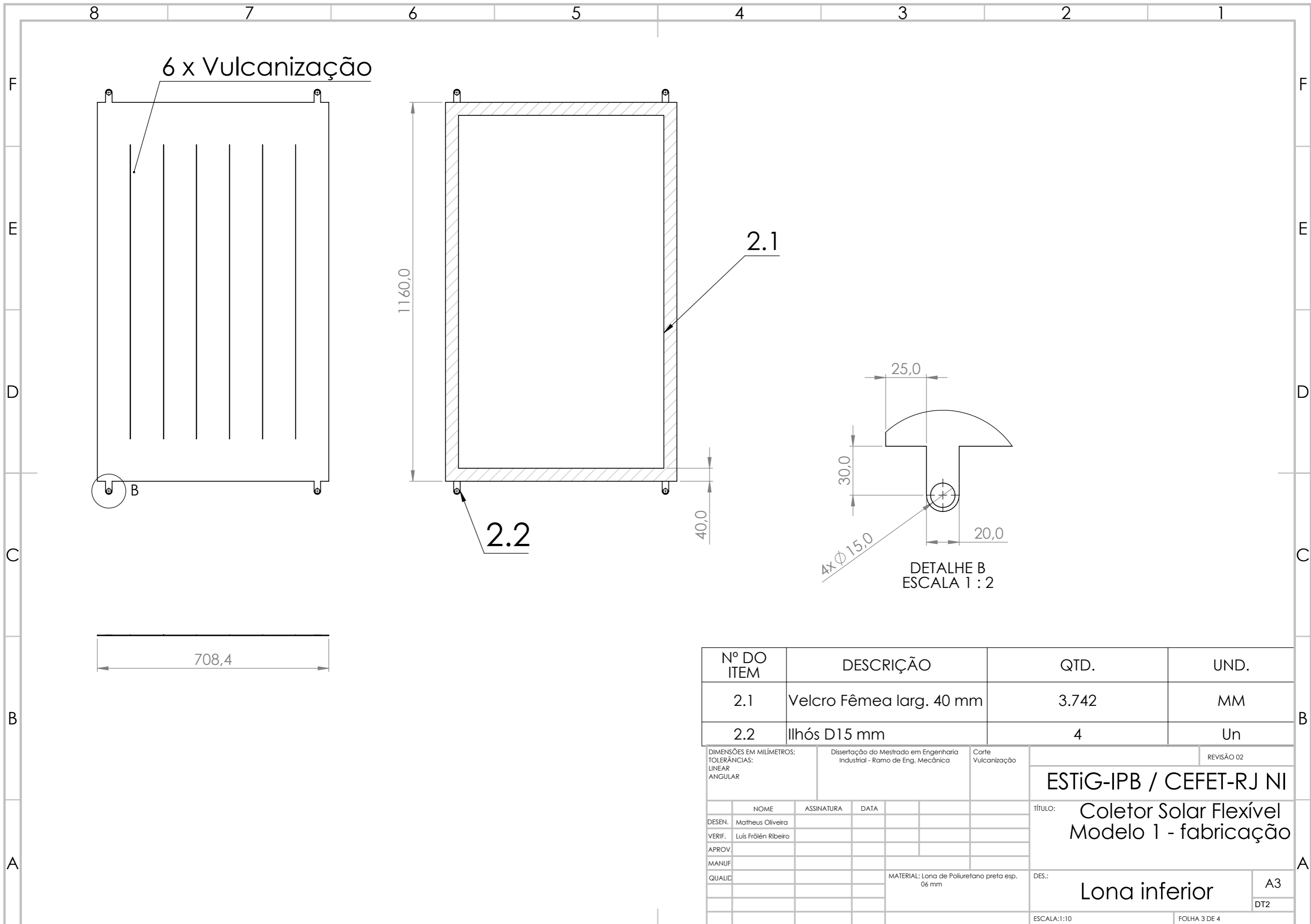


Velcro



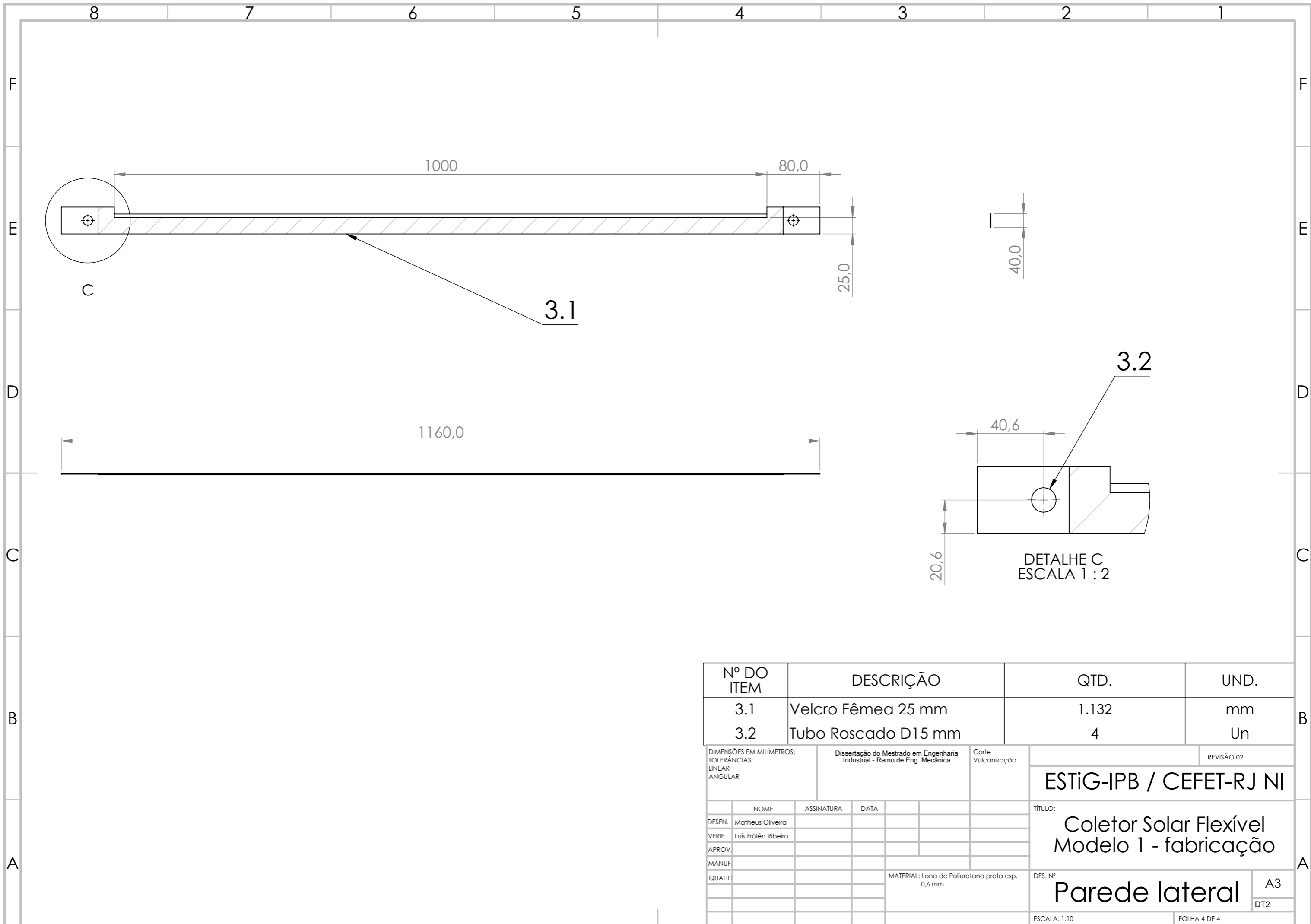
DETALHE A
ESCALA 1 : 5

DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 02	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1 - fabricação	
DESEN. Matheus Oliveira		ASSINATURA		DATA		DES.: Lona superior	
VERIF. Luís Frólén Ribeiro						A3	
APROV.						DT2	
MANUF						ESCALA:1:10	
QUALID				MATERIAL: Lona de Poliuretano preta esp. 0,6 mm 1.416,0 mm de Velcro Fêmea larg. 25 mm		FOLHA 2 DE 4	



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	UND.
2.1	Velcro Fêmea larg. 40 mm	3.742	MM
2.2	Ilhós D15 mm	4	Un

DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 02	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1 - fabricação	
						DES.: Lona inferior	
						A3	
						DT2	
						ESCALA:1:10	
						FOLHA 3 DE 4	



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	UND.
3.1	Velcro Fêmea 25 mm	1.132	mm
3.2	Tubo Roscado D15 mm	4	Un

DIMENSÕES EM MILÍMETROS: TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 02	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 1 - fabricação	
						DES. Nº Parede lateral	
						A3 DT2	
						ESCALA: 1:10	
						FOLHA 4 DE 4	

4.1.9.1. Planificação

A primeira etapa para a fabricação do coletor ocorre antes mesmo da linha de produção. Após definir o modelo 3D que será produzido, é preciso dividi-lo em peças e torna-lo plano (2D) para que as peças sejam cortadas, essa etapa é conhecida como planificação.

Para planificar o desenho, a empresa parceira possui um *software* específico que realiza essa função, o ficheiro com o desenho é importado para o programa e são seleccionadas quais serão as peças do produto e o programa realiza a conversão de 3D para 2D. A Figura 4.7 mostra como o protótipo é exportado do *software* após ser planificado.

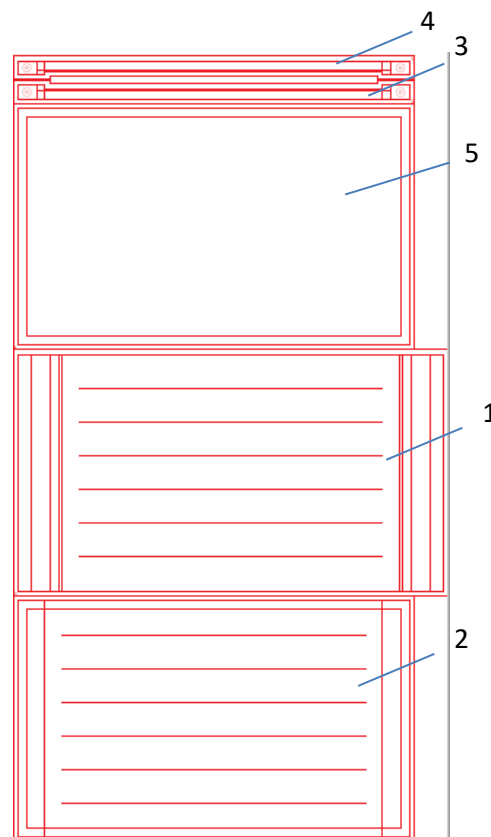


Figura 4.7 - Peças do coletor 2D planificadas no software. 1- Peça superior; 2- Peça inferior; 3,4- Paredes laterais; 5- Capa para isolamento.

Esse protótipo foi dividido em cinco peças para serem produzidas com a lona preta, como numerado na Figura 4.7. É possível notar marcações nesta mesma Figura, elas serão explicadas a seguir.

4.1.9.2. Corte e marcação

A segunda etapa é a de corte e marcação. O desenho 2D é enviado para a primeira máquina da linha de produção, que é abastecida com rolos de Poliuretano da cor desejada. Nela ocorre o corte das peças e, ao mesmo tempo, ocorre a marcação das indicações de costura, acabamento, locais de aplicação do Velcro e o que mais for necessário nas peças. Essas marcações são vistas na Figura 4.7.

É possível identificar na Figura 4.8 as peças do coletor após a etapa de corte e antes de serem cosidas e a Figura 4.9 exhibe a peça da parede lateral ampliada, podendo observar as marcações.

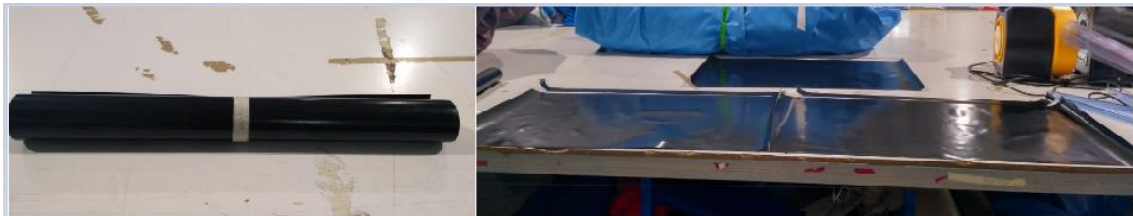


Figura 4.8 - Peças enroladas (e) e organizadas na bancada (d)



Figura 4.9 - Exemplo de marcações

4.1.9.3. Costura

O coletor foi projetado para que as peças possam ser unidas através da vulcanização visto que com a costura há vazamento de água. Entretanto, o principal objetivo deste protótipo foi avaliar seu processo de fabricação e verificar algumas das características pretendidas do produto final, como maneabilidade e aparência do coletor completo.

Essa etapa é a mais demorada e a que mais exige trabalho manual, um detalhe é que a placa deve ser cosida com os casquilhos dentro dela. Essa etapa inclui a costura das tiras de Velcro nas peças e a costura das peças em si. Na Figura 4.10 é possível verificar o coletor entre etapas da costura:



Figura 4.10 - Etapas da costura do coletor. 1 – Costura do Velcro nas paredes laterais; 2 – Costura das paredes laterais com a peça superior; 3 – Costura entre as peças superior e inferior; 4 – Coletor completamente cosido

4.2. Segundo modelo de coletor

O segundo modelo foi projetado a partir das oportunidades de melhoria identificadas no processo de fabricação, mantendo as mesmas eficiência e capacidade térmica.

Esse coletor também é composto por três partes: cobertura transparente, placa absorvedora e capa para isolamento.

4.2.1. Características geométricas do segundo coletor

As medidas externas mantiveram-se praticamente inalteradas, com 1160,0 mm de comprimento e 706,0 mm de largura. Nos canais de coleta/distribuição houve alteração na altura, mantiveram-se os 80 mm de largura, só que agora com 30 mm de altura.

O novo coletor possui cinco canais de aquecimento de água, com 900 mm de comprimento, altura de 30 mm e 140 mm de largura. O espaçamento de 50 mm entre os canais de aquecimento e coleta/distribuição se manteve. No novo modelo, cabem 2,52 litros de água em cada canal de abastecimento e coletor comporta no máximo 18 litros de água. A placa possui 0,70 m² de área irradiada. Tiras retangulares que recebem os ilhós foram inseridas nas extremidades dos eixos centrais de cada canal.

A Figura 4.11 exibe a placa absorvedora em vista isométrica e detalhada.

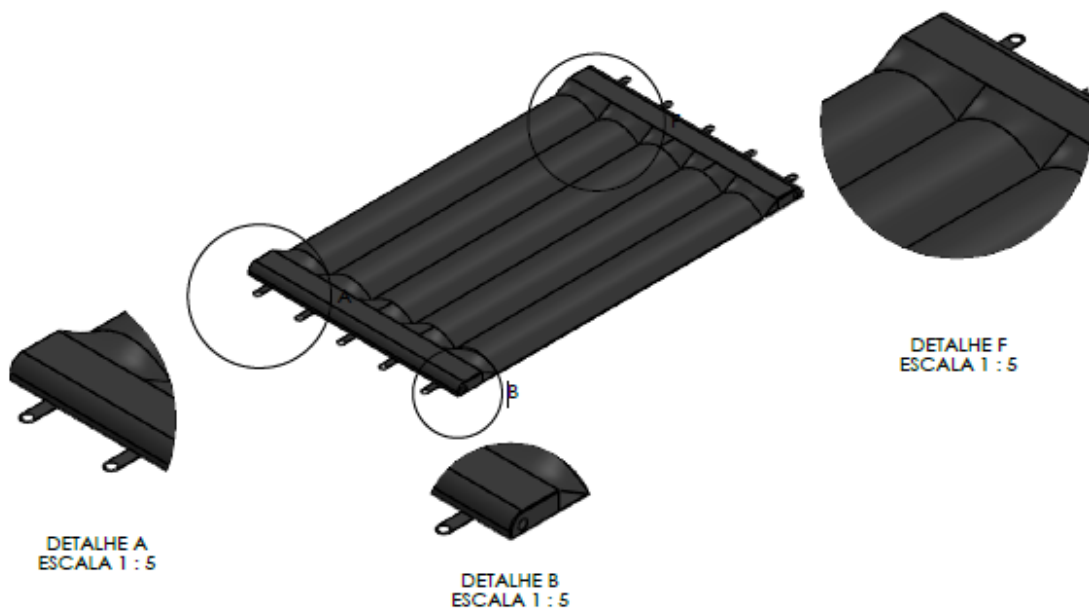


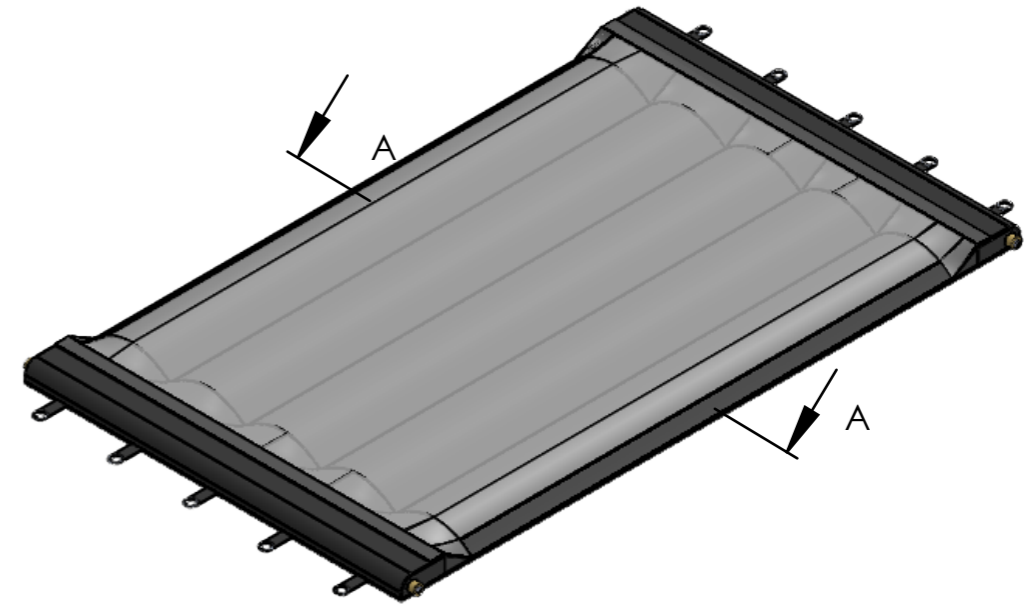
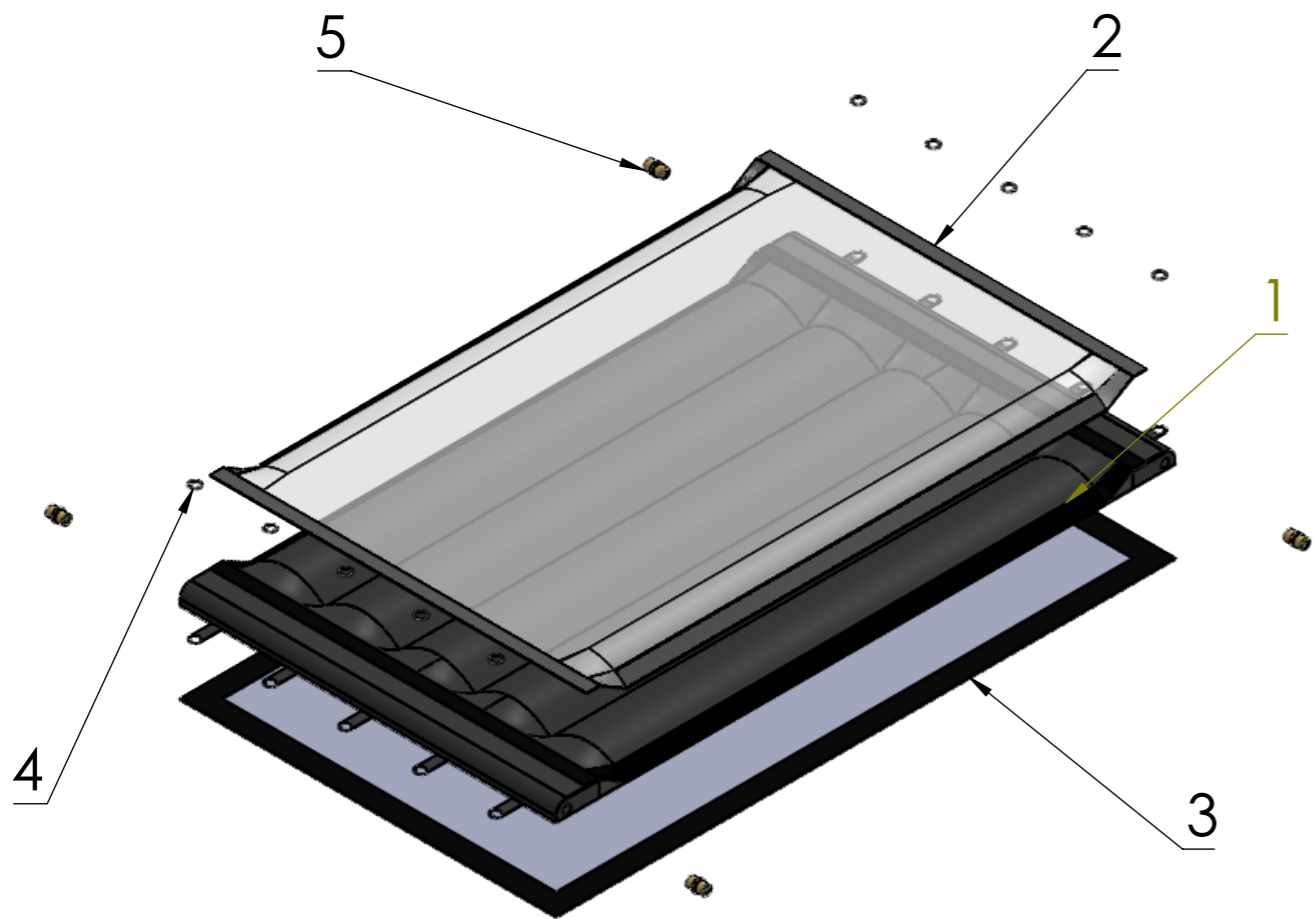
Figura 4.11 - Segundo modelo de coletor solar

Os desenhos técnicos desse modelo de coletor solar são mostrados no DT3. Como mostrado na primeira folha, o coletor também é composto pela placa absorvedora (1), cobertura transparente (2), capa para isolamento (3), dez olhais (4) e quatro tubos roscados (5).

As folhas seguintes apresentam, respectivamente, as projeções ortogonais com as medidas e materiais utilizados da placa absorvedora, cobertura transparente e capa para isolamento.

8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A



SEÇÃO A-A

NOTAS:

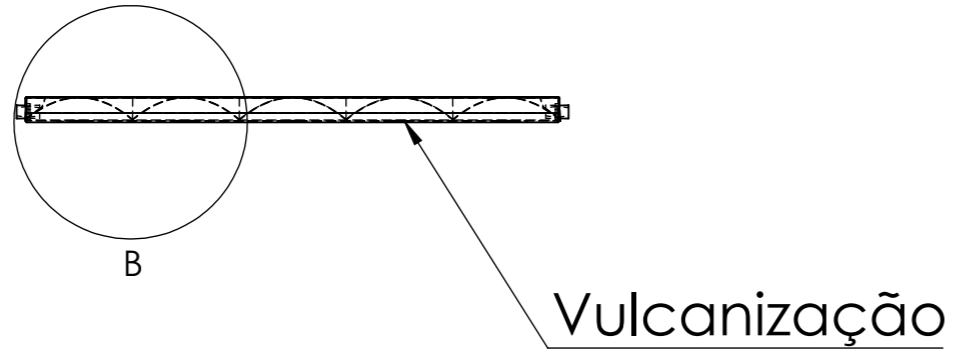
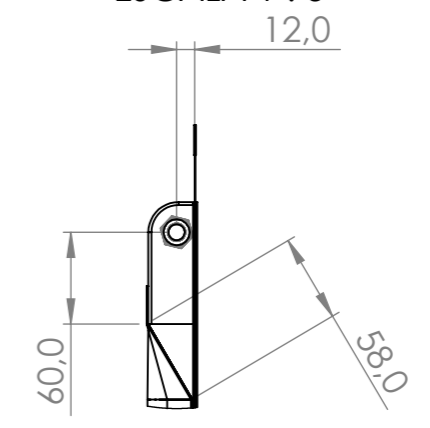
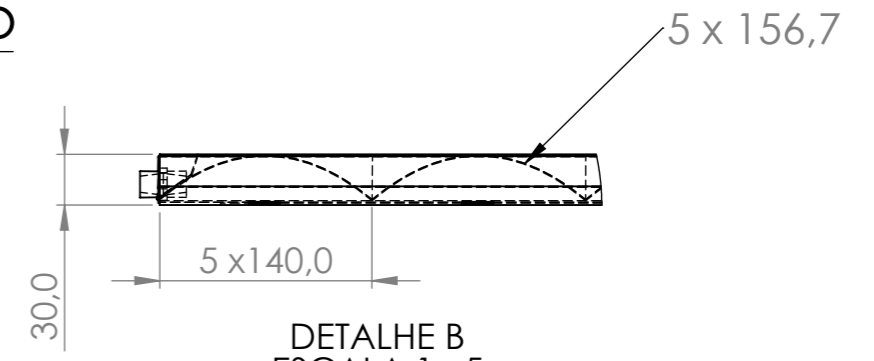
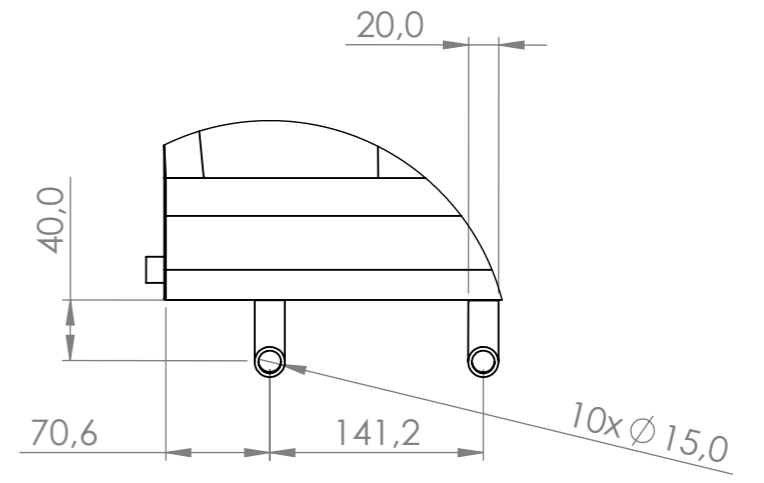
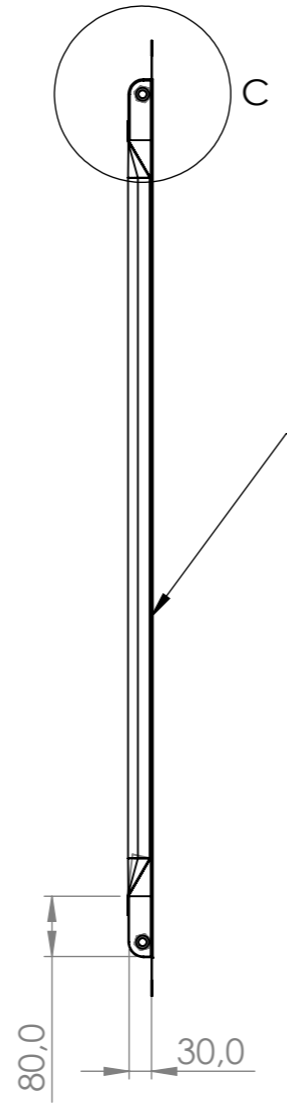
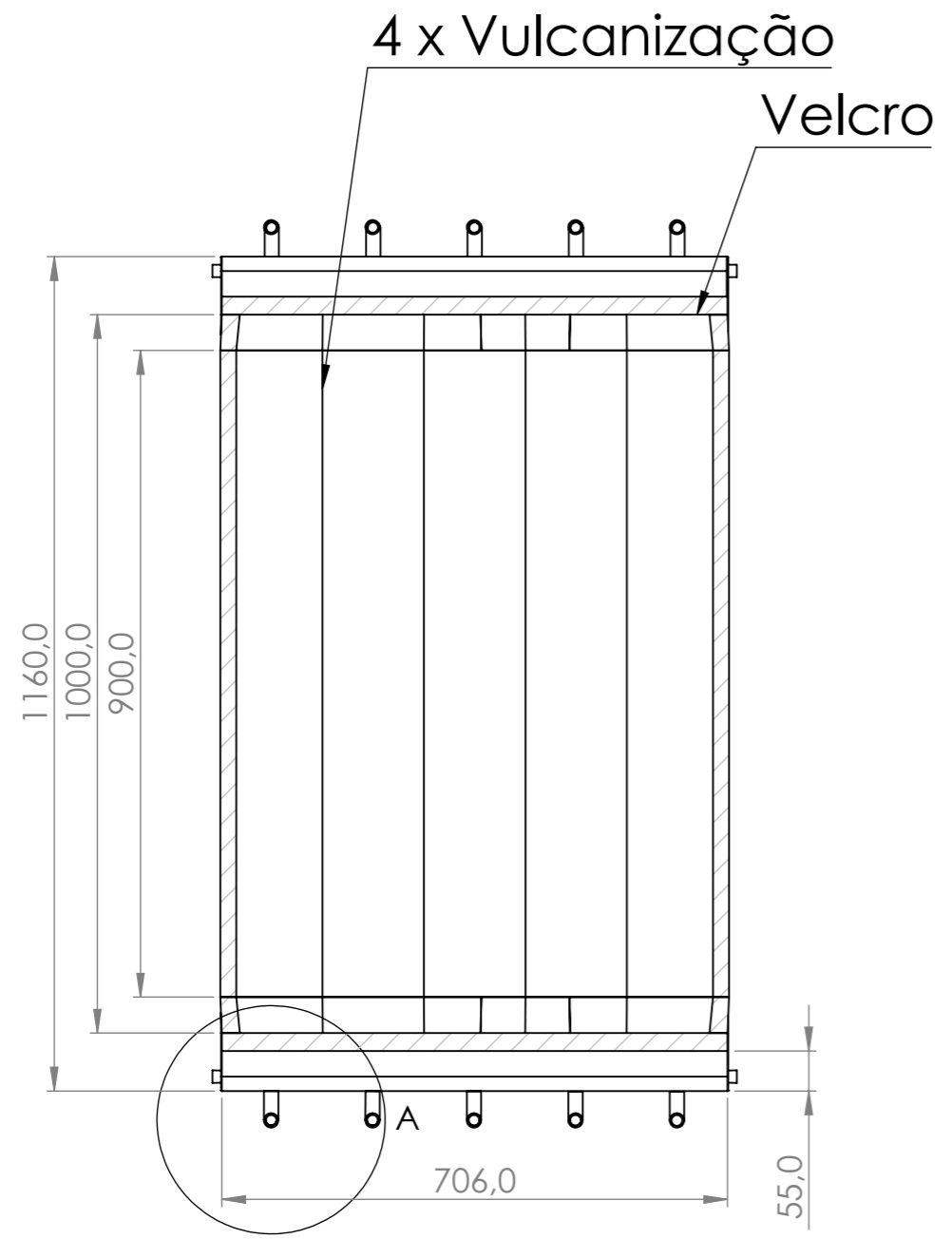
- O coletor é fabricado com folhas de Poliuretano, portanto as geometrias representadas nos desenhos são as esperadas com o produto cheio de água;
- Os chanfros feitos nos desenhos servem para dizer que o coletor não possui medidas retas, porém os valores mais importantes são as medidas do perímetro.

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	UND.
1	Placa absorvedora	1	Un
2	cobertura transparente	1	Un
3	Capa para isolamento	1	Un
4	Ilhós D15 mm	10	Un
5	Tubo roscado D15 mm	4	Un

DIMENSÕES EM MILÍMETROS: TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização	REVISÃO 00
					ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI
					TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 2
					DES: Coletor Completo
					A3 DT3

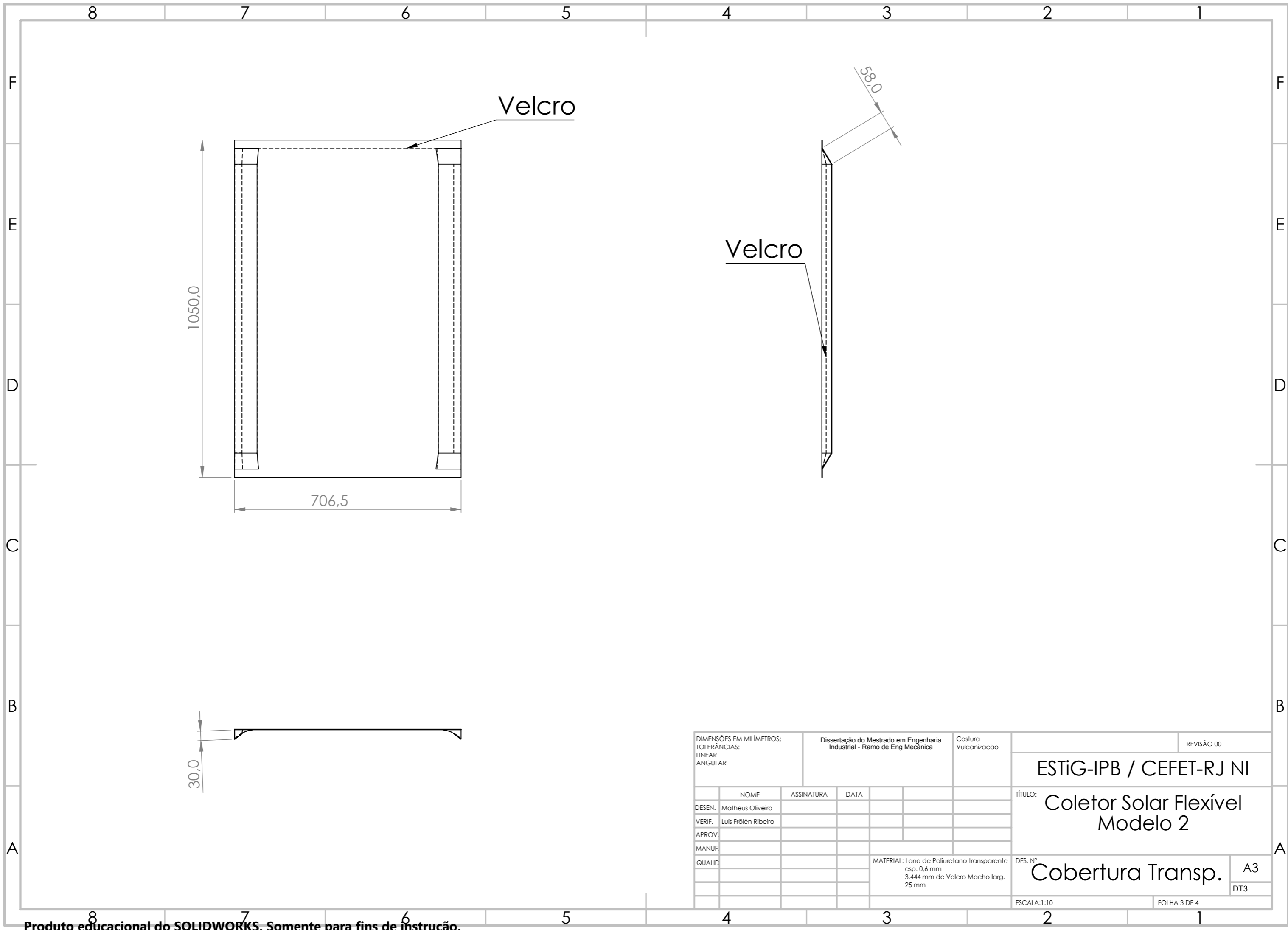
8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A



DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 00	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 2	
						DES: Placa Absorvedora	
				MATERIAL: Lona de Poliuretano preta esp. 0,6 mm 3,444 mm de Velcro Fêmea larg. 25 mm		A3 DT3	
				ESCALA:1:10		FOLHA 2 DE 4	

8 7 6 5 4 3 2 1



Velcro

Velcro

1050,0

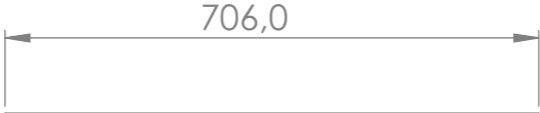
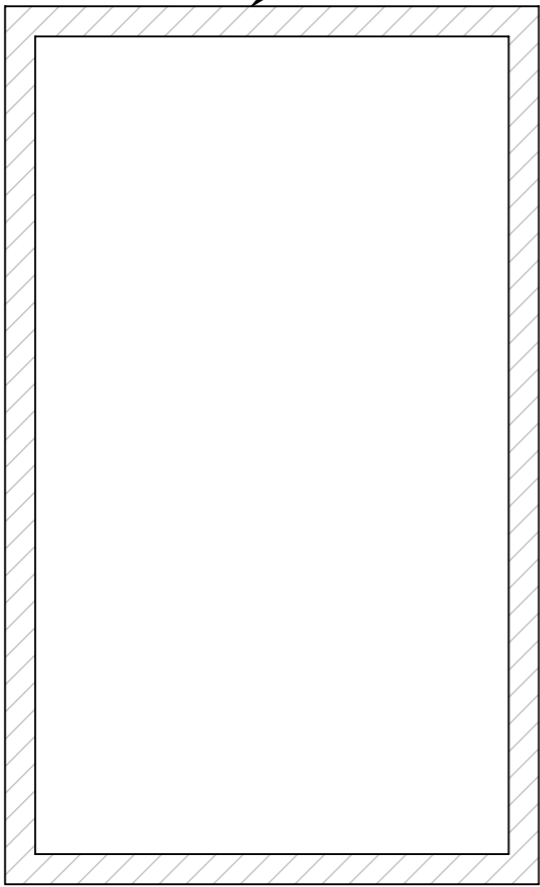
706,5

58,0

30,0

DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng Mecânica		Costura Vulcanização	REVISÃO 00
					ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI
					TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 2
DESEN.	Matheus Oliveira	ASSINATURA	DATA		DES. Nº Cobertura Transp. A3 DT3
VERIF.	Luis Frólén Ribeiro				
APROV.					
MANUF					
QUALID					
MATERIAL: Lona de Poliuretano transparente esp. 0,6 mm 3.444 mm de Velcro Macho larg. 25 mm					ESCALA:1:10
					FOLHA 3 DE 4

Velcro



DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 00	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 2	
				MATERIAL: Lona de Poliuretano preta esp. 0,6 mm 3.734 mm de Velcro Macho larg. 40 mm		DES. Capa para Isolamento	
						A3 DT3	
				ESCALA:1:10		FOLHA 4 DE 4	

4.2.2. Dimensionamento estrutural

Foi feito o cálculo estrutural para verificar se as tiras retangulares projetadas eram suficientes para aguentar o coletor cheio de água e servir como fixação. As principais características da lona de Poliuretano (PU) são apresentadas na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Características estruturais do Poliuretano [41]

Material 100% pes – 1100 dtex	
Peso:	630 g/m ²
Resistência à Ruptura:	1800 N/5cm
Resistência à Temperatura	-30/+70 °C

Considerando a resistência à ruptura como tensão máxima admissível, é possível encontrar o Fator de Segurança a partir da Equação 4.3:

$$FS = \frac{F}{\sigma_c * L} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

Onde,

FS = fator de segurança, adimensional

F = Força aplicada nos ilhós pelo peso da água dentro do coletor, N

σ_c = Tensão admissível da lona de Poliuretano, N/mm

L = Comprimento dos ressaltos para os ilhós, mm.

Além da resistência dos ilhós, também foi preciso calcular a pressão hidrostática do sistema:

$$Ph = \rho * g * h \quad \text{Eq. (4.4)}$$

Onde,

Ph = Pressão hidrostática, Pa

ρ = Massa específica, kg/m³

g = Gravidade, m/s²

h = Distância entre o topo do tanque e a parte mais inferior do coletor, m

Esse cálculo foi realizado no pior caso do sistema e sem considerar nenhum apoio, como exemplificado na Figura 4.12:

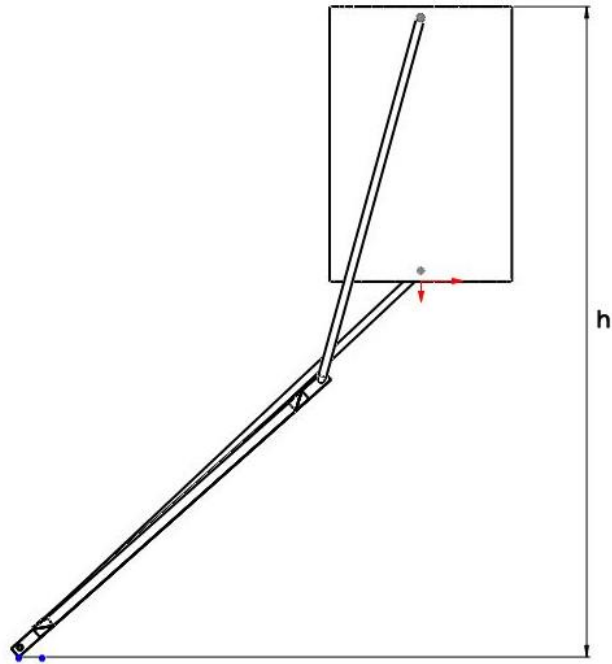


Figura 4.12 - Sistema com a altura h para o cálculo da Ph

4.2.3. Simulações

O reservatório, tubagens e condições climáticas mantiveram-se as mesmas condições e características nas simulações de ambos os coletores. Porém, foram feitas duas simulações distintas para esse segundo protótipo: a primeira do sistema fechado, similar à feita anteriormente, para comparar o desempenho, e uma segunda apenas do coletor, com entrada de água em velocidades constantes.

4.2.3.1. Simulação do sistema fechado

Além da placa absorvedora, houve apenas duas diferenças com relação ao sistema simulado anteriormente. A Figura 4.13 mostra o sistema completo:

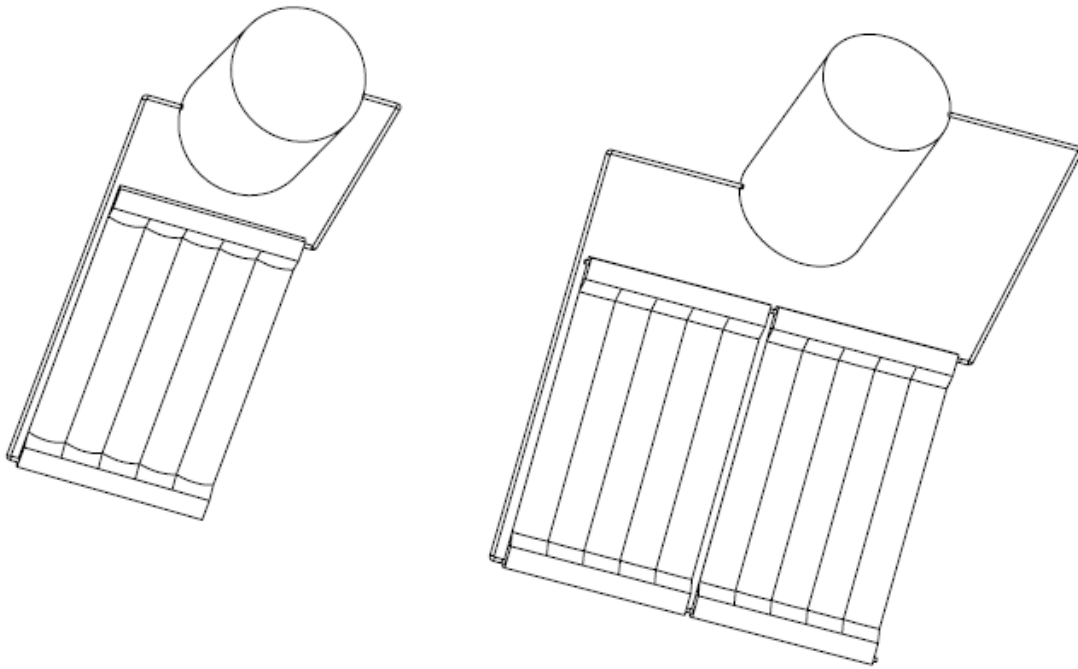


Figura 4.13 – Sistema para simular com 1 coletor (e) e dois coletores (d)

A primeira diferença foi na configuração da geometria, ela foi editada em outro software de CAD disponibilizado pelo Ansys, o *SpaceClaim*. Dentro do *SpaceClaim* foi selecionada a opção *share* na análise de *Share Topology*. Nessa configuração o programa imprime e mescla todos os corpos nos componentes e transfere para o Ansys como uma peça com múltiplos corpos, ou seja, ele entende que a seção entre os corpos é uma região de transferência entre os corpos.

A segunda diferença foi na hora de gerar a malha, a malha tetraédrica foi gerada automaticamente, utilizando a função de tamanho “*proximity and curvature*” e mantendo todas as outras características semelhantes a da malha anterior. Apesar de consumir mais recursos computacionais, essa função gera simulações mais estáveis. A Figura 4.14 mostra a distribuição dos nós:

Nota-se que a malha é tão refinada no coletor, pois é preciso ampliar a imagem para enxergar os nós, já que na vista de uma perspectiva que apresenta todo o sistema, o coletor aparece como um objeto totalmente negro.

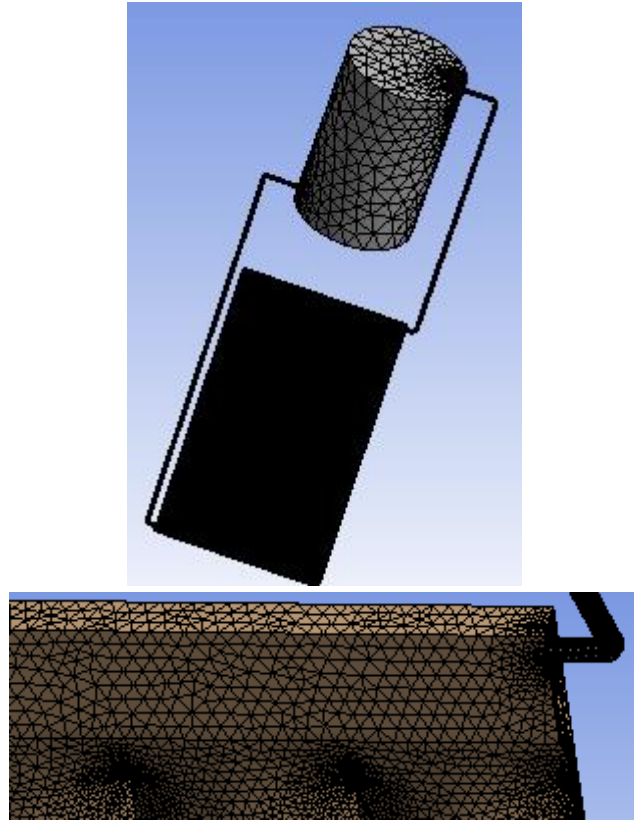


Figura 4.14 - Malha com a função "Proximity and curvature"

A tabela 4.5 representa a quantidade de nós e elementos de cada simulação do segundo modelo, pode-se observar que o número de nós foi cerca de três vezes maior e tiveram cerca de seis vezes mais elementos, quando comparado com as simulações do primeiro modelo. Já em relação ao tempo de simulação, com a malha mais simples, o sistema levava cerca de quatro horas finalizar os cálculos enquanto esse tempo de cálculo aumentou para cerca de catorze horas com a malha mais refinada:

Tabela 4.5 - Nós e Elementos com a função "Proximity and curvature"

Cidade	Nós	Elementos
Porto – 1 placa	210254	680272
Porto – 2 placas	380871	1127002
Fortaleza – 1 placa	201305	925171
Fortaleza – 2 placas	304414	1384684

4.2.3.2. Simulação da placa isolada

A segunda simulação foi feita apenas com a placa, ela foi posicionada com a mesma inclinação utilizada anteriormente para Porto e Fortaleza, até porque foram considerados os

mesmos fluxos de calor. A geometria foi exportada do *SolidWorks* para o *Ansys* e editada apenas no *Design Modeler*. A superfície superior da placa foi selecionada e nomeada como uma seleção à parte, para ser a área irradiada.

Já nas condições de contorno, a parte inferior foi considerada adiabática, já não existem mais paredes laterais, os tubos de coleta/distribuição foram considerados retangulares para facilitar a simulação, com isso, suas laterais também foram consideradas adiabáticas e no furo de 15 mm de diâmetro da parte inferior do coletor, foi definida uma velocidade constante de entrada da água e temperatura de 20 °C.

Para verificar a influência da velocidade no desempenho do coletor, foram feitas três simulações para cada estação com velocidades distintas. A primeira velocidade foi de 0,06 m/s, esse valor foi escolhido por gerar um caudal mássico de 38,17 l/h, próximo do limite de 40 l/h. Para as simulações seguintes, a velocidade decresceu em valores constantes para 0,04 m/s e 0,02 m/s. A Figura 4.15 mostra o esquema dessa simulação:

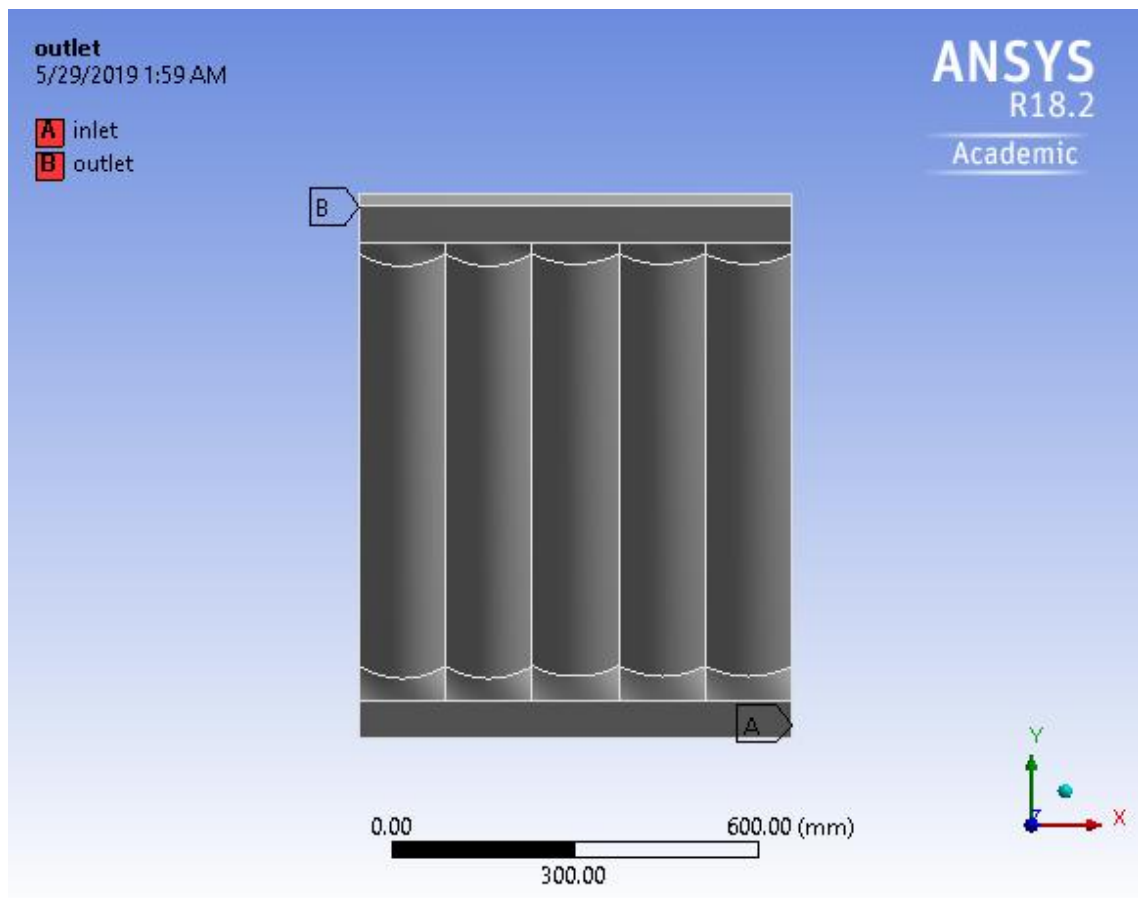


Figura 4.15 - Condições de contorno da simulação na placa

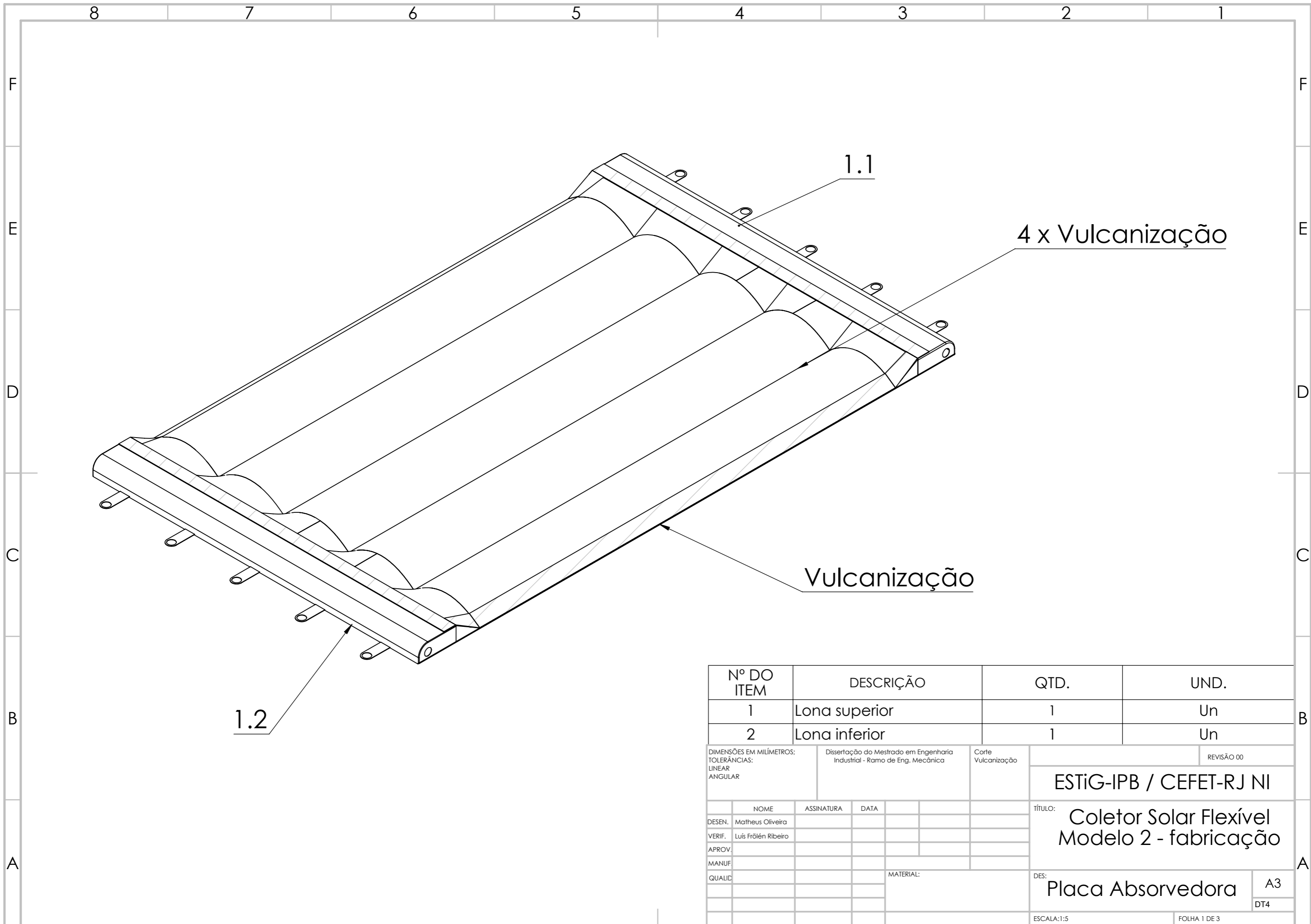
4.2.4. Processo de Fabrico do Segundo Protótipo

As etapas para fabricação do Segundo Protótipo são basicamente as mesmas apresentadas na subsecção 4.1.9, as principais diferenças são: Esse modelo possui duas peças a menos (as paredes laterais) e será feita Vulcanização no lugar da costura.

Apesar desse protótipo não ter sido fabricado, seus desenhos de fabricação foram feitos e são mostrados a seguir:

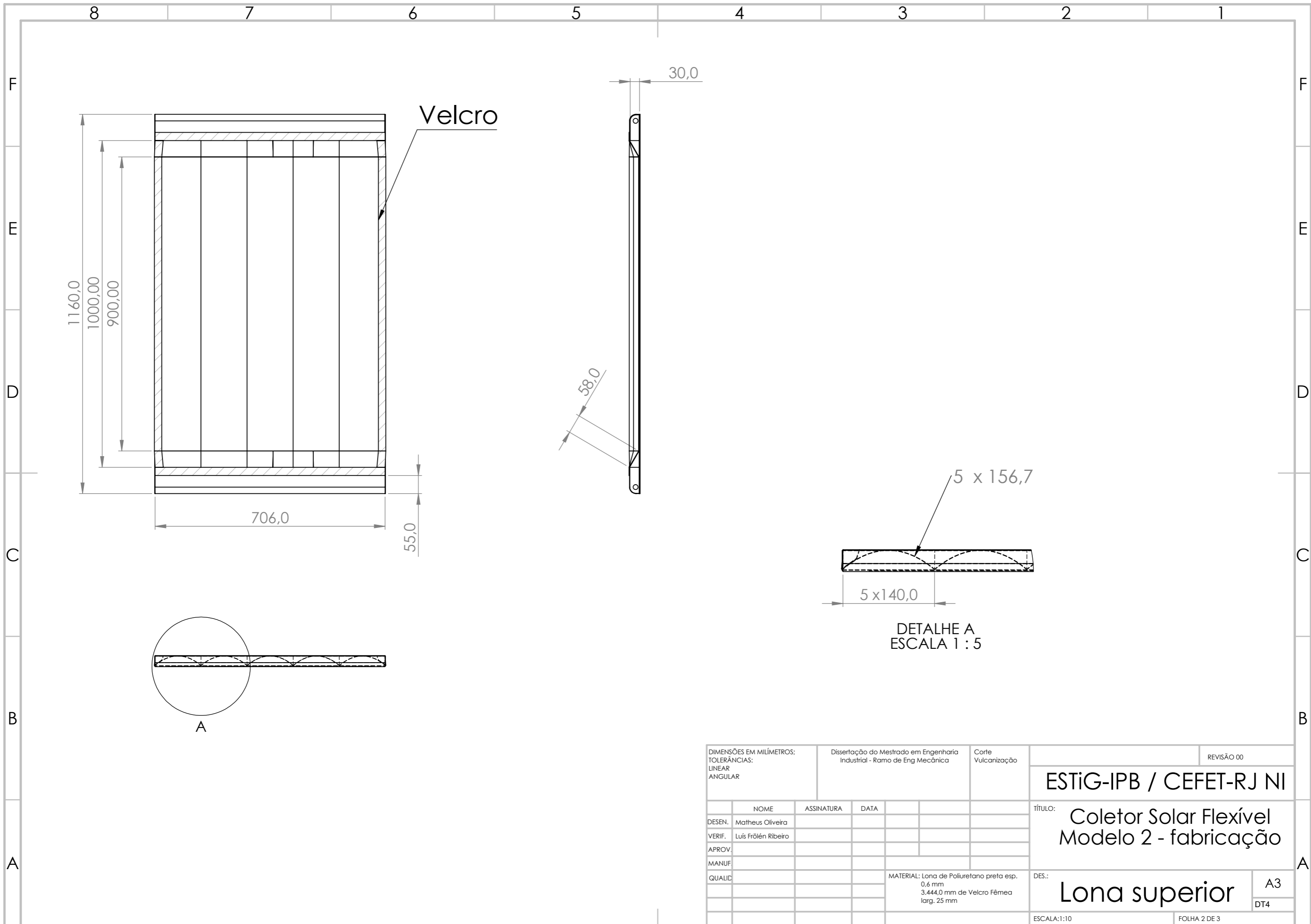
A primeira folha do desenho técnico DT4 já exhibe uma diferença com relação ao primeiro modelo, pois a placa absorvedora é constituída apenas por uma lona superior e uma lona inferior. Além disso, nota-se a redução no número de vulcanizações, sendo preciso vulcanizar apenas no perímetro entre as duas lonas e realizar quatro linhas para formar os canais de passagem de água.

A segunda folha exhibe as medidas da lona superior, locais de aplicação de Velcro e locais de instalação dos tubos roscados. A terceira folha contém as medidas da lona inferior, locais de aplicações do Velcro e instalação dos ilhós.



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	UND.
1	Lona superior	1	Un
2	Lona inferior	1	Un

DIMENSÕES EM MILÍMETROS:		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 00	
TOLERÂNCIAS:						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
LINEAR						TÍTULO: Coletor Solar Flexível	
ANGULAR						Modelo 2 - fabricação	
	NOME	ASSINATURA	DATA			DES: Placa Absorvedora	
DESEN.	Matheus Oliveira					A3	
VERIF.	Luís Frólen Ribeiro					DT4	
APROV.						ESCALA:1:5	
MANUF.						FOLHA 1 DE 3	
QUALID							



Velcro

1160,0
1000,0
900,0

706,0

55,0

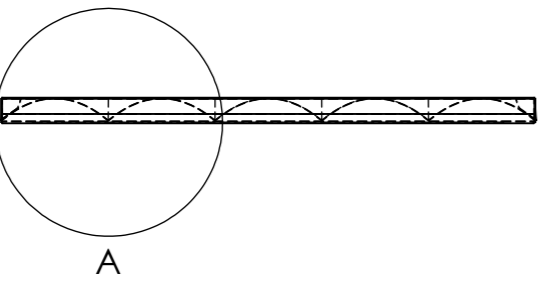
30,0

58,0

5 x 156,7

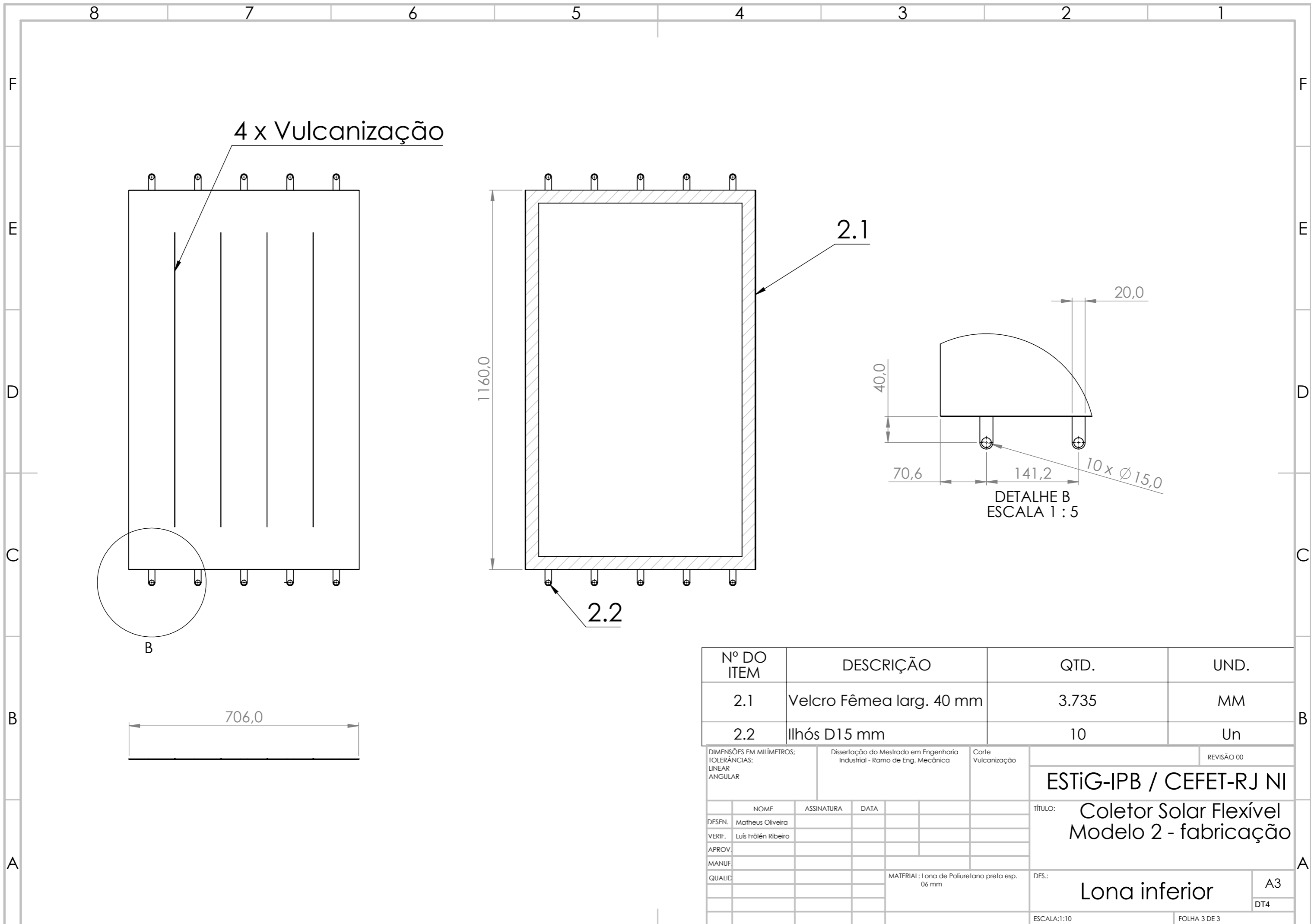
5 x 140,0

DETALHE A
ESCALA 1 : 5

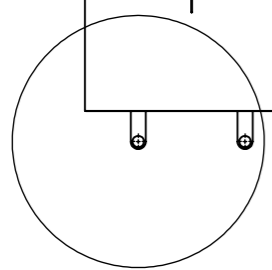


A

DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng Mecânica		Corte Vulcanização	REVISÃO 00
					ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI
					TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 2 - fabricação
					DES.: Lona superior
					A3 DT4
					ESCALA:1:10
					FOLHA 2 DE 3

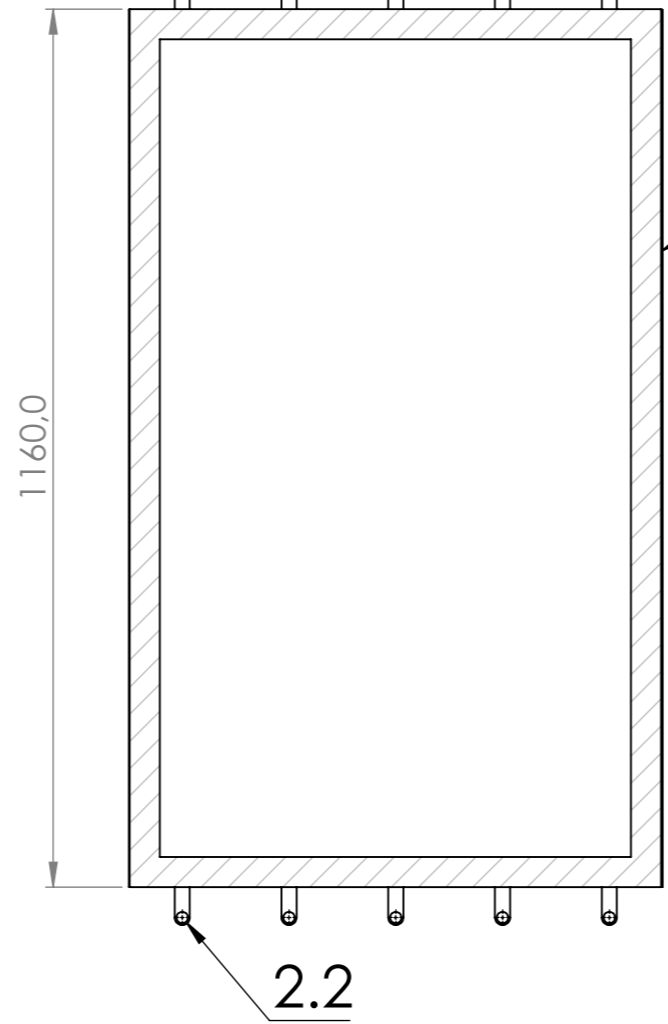


4 x Vulcanização



B

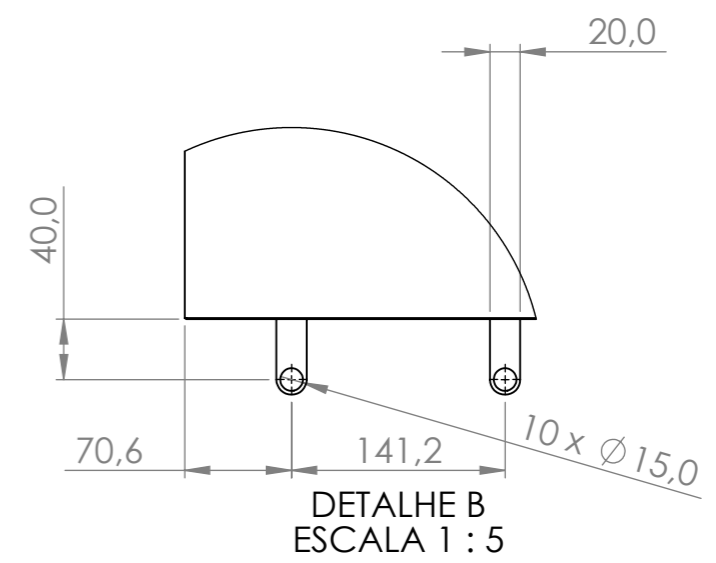
706,0



1160,0

2.1

2.2



DETALHE B
ESCALA 1 : 5

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	UND.
2.1	Velcro Fêmea larg. 40 mm	3.735	MM
2.2	Ilhós D15 mm	10	Un

DIMENSÕES EM MILÍMETROS; TOLERÂNCIAS: LINEAR ANGULAR		Dissertação do Mestrado em Engenharia Industrial - Ramo de Eng. Mecânica		Corte Vulcanização		REVISÃO 00	
						ESTiG-IPB / CEFET-RJ NI	
						TÍTULO: Coletor Solar Flexível Modelo 2 - fabricação	
						DES.: Lona inferior	
						A3 DT4	
						ESCALA:1:10	
						FOLHA 3 DE 3	

5. Resultados e Discussão

São analisados neste capítulo os resultados das simulações numéricas realizados nos cenários propostos no Capítulo 4 – Materiais e Métodos, bem como os resultados da prototipagem. Foram simulados dois sistemas de aquecimento para as cidades: com uma e duas placas coletoras. Também foi simulada a situação do coletor isolado, com variação da velocidade de entrada.

As condições do sistema foram citadas no capítulo 4. O sistema com uma placa foi simulado para verificar a eficiência da placa, enquanto as simulações com duas placas em paralelo tiveram o objetivo de alcançar a temperatura de água de uso próxima dos 40 °C, valor indicado por Belinazo [6]. Em cada simulação registrou-se a temperatura da água no reservatório, a temperatura na saída do coletor e o caudal mássico. A distribuição de temperaturas ao final do dia pode ser vista na Figura 5.1.

A simulação da placa isolada teve a finalidade de verificar a sua eficiência e a influência da variação da velocidade da água no desempenho do coletor.

Por fim, com a prototipagem identificaram-se oportunidades de melhoria na produção e para se obter um coletor mais simples e barato de ser produzido.

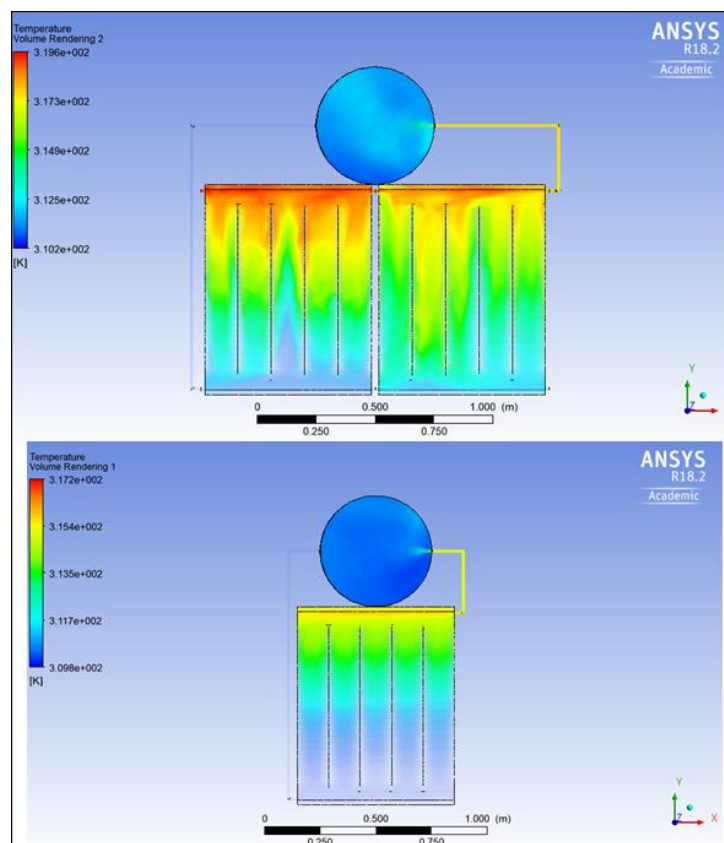


Figura 5. 1 - Distribuição de temperatura do fluido no sistema

5.1. Sistema no Porto

O primeiro sistema simulado foi no inverno do Porto, Este caso foi escolhido para verificar se o coletor conseguia atender a demanda em uma cidade europeia de clima temperado. Foram feitas simulações utilizando os dois modelos de coletores desenvolvidos. O comportamento da Temperatura de uso (no reservatório), Temperatura de saída e caudal mássico são exibidos nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 respectivamente.

É possível observar que os gráficos da velocidade de saída e caudal mássico no Modelo 1 apresentam picos de instabilidade e são mais estáveis no Modelo 2, isso ocorre devido a malha utilizada em cada caso, no primeiro modelo foi utilizada uma malha que consome menos recurso computacional, porém é menos estável e a partir dos resultados obtidos, a malha foi refinada para o segundo modelo.

Ao comparar o comportamento das variáveis analisadas com o comportamento do Fluxo de calor mostrado na Figura 4.6, é possível notar que a taxa de aquecimento da água de uso é maior enquanto o fluxo de calor cresce, e há um decréscimo quando o fluxo de calor diminui. Esse comportamento já era esperado, assim como o a temperatura de saída e caudal mássico apresentarem curvas com o mesmo comportamento do fluxo de calor. Esses comportamentos são observados para todas as simulações.

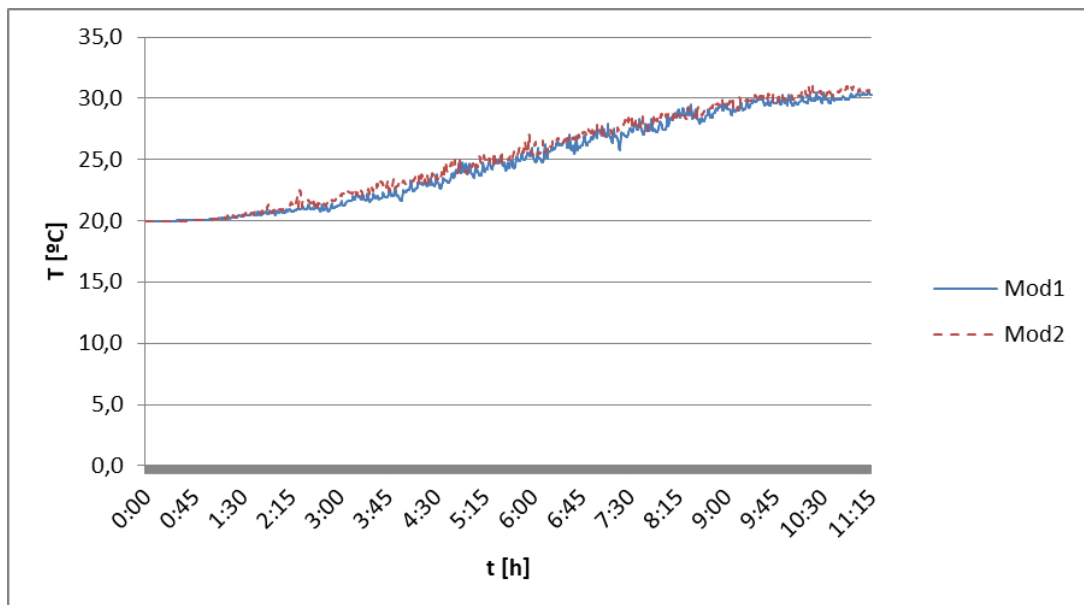


Figura 5.2 - Comportamento da temperatura de uso no inverno do Porto com uma placa

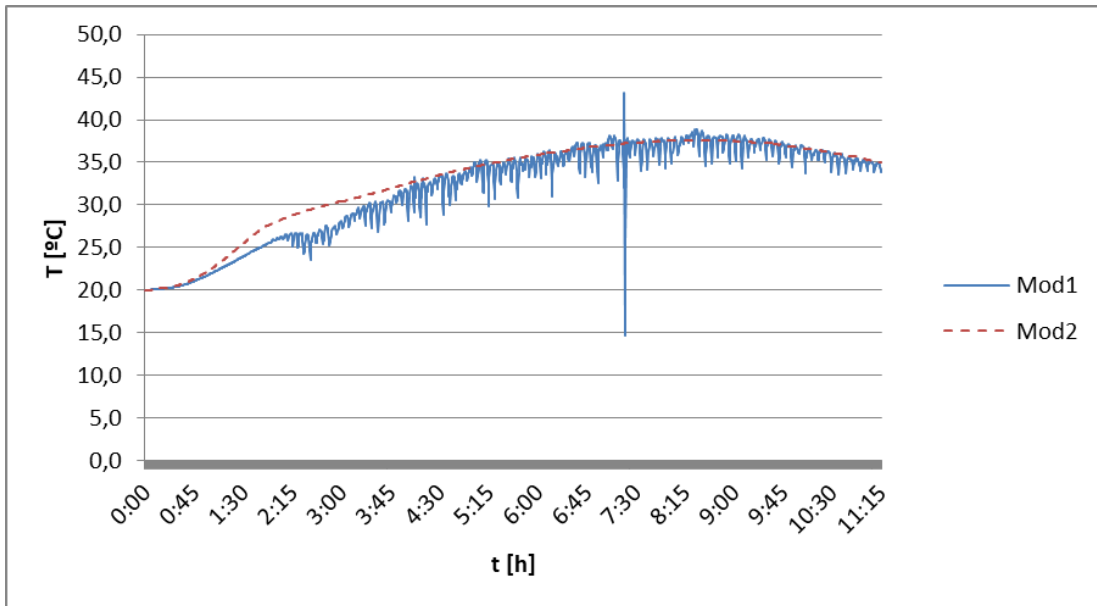


Figura 5.3 - Comportamento da temperatura de saída no inverno do Porto com uma placa

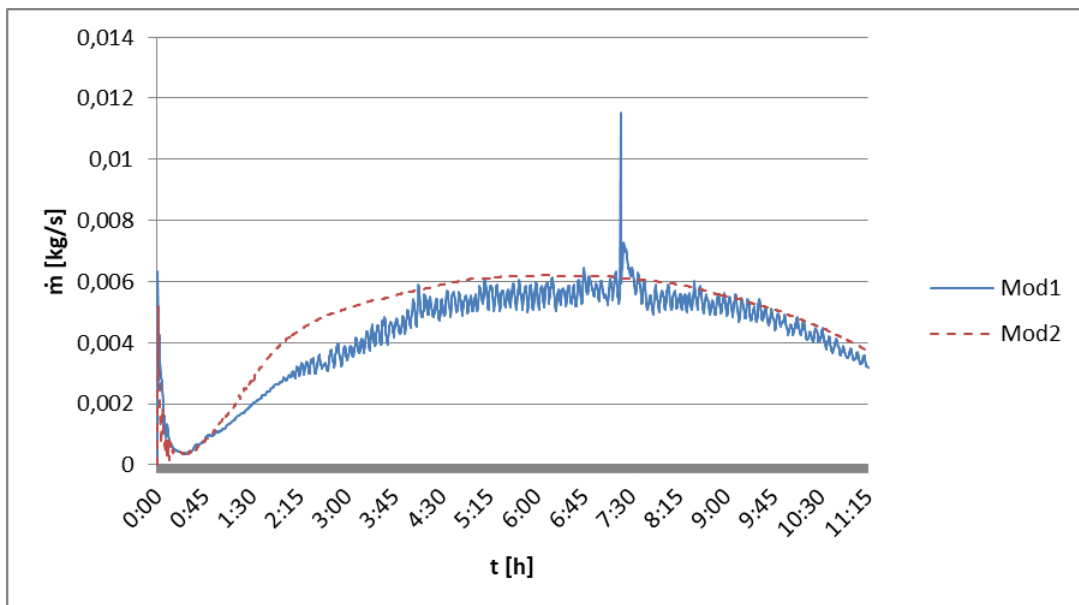


Figura 5.4 - Comportamento do caudal mássico no inverno do Porto com uma placa

Ao fim do dia, o primeiro modelo eleva a água de 20 °C para 30,66 °C e o segundo modelo eleva para 30,61 °C, isso mostra que mesmo com a simplificação no processo de fabricação, foi possível desenvolver um produto possivelmente mais barato e com o mesmo desempenho. As temperaturas máximas na saída foram respectivamente para o primeiro e segundo modelos de 38,89 °C e 37,62 °C. O caudal mássico máximo foi de 0,00618 kg/s e 0,00621 kg/s no primeiro e segundo coletor respectivamente, ambos um caudal volumétrico de 22 L/h, esse valor não supera o limite de 40 L/h.

As temperaturas de saída do coletor em ambos os casos não atingiu temperaturas preocupantes, se mantendo distantes dos 70 °C de limite do material. As temperaturas de uso

se mantiveram praticamente as mesmas, variando apenas centésimos de grau, isso ocorreu devido às características dos coletores manterem-se próximas, tanto o volume de água aquecida (12,6 litros para ambos) e área irradiada (0,73 e 0,70 m²).

Para o sistema com duas placas, comportamento da Temperatura de uso (no reservatório), Temperatura de saída e caudal mássico são exibidos nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 respectivamente. Os modelos tiveram os seguintes desempenhos: temperatura de uso no final do dia de 40,08 °C e 39,77 °C, temperatura máxima na saída de 49,63 °C e 48,96 °C e caudais mássicos máximos de 0,00845 kg/s e 0,00852 kg/s, valores para o primeiro e segundo coletor, respectivamente.

Assim como no sistema com uma placa, as temperaturas de uso variaram menos de um grau e conseguiram alcançar os 40 °C estipulados inicialmente, as temperaturas de saída aumentaram, porém ainda se mantiveram distantes do limite do material. Os caudais volumétricos máximos foram de 31 L/h e 30 L/h (primeiro e segundo modelo), também abaixo dos 40 L/h para não prejudicar o efeito Termossifão.

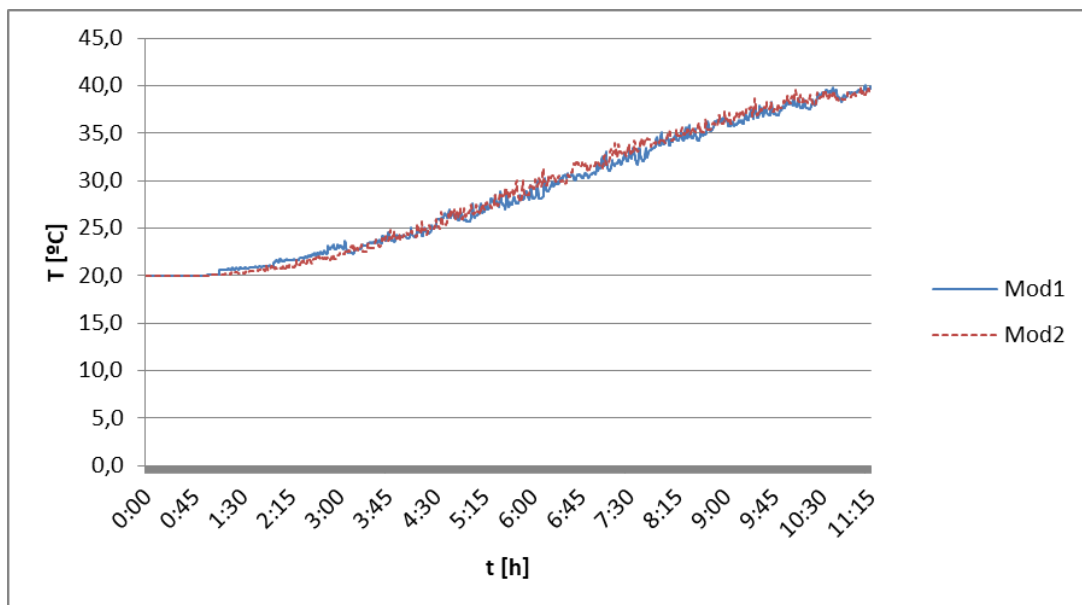


Figura 5.5 - Comportamento da temperatura de uso no inverno do Porto com duas placas

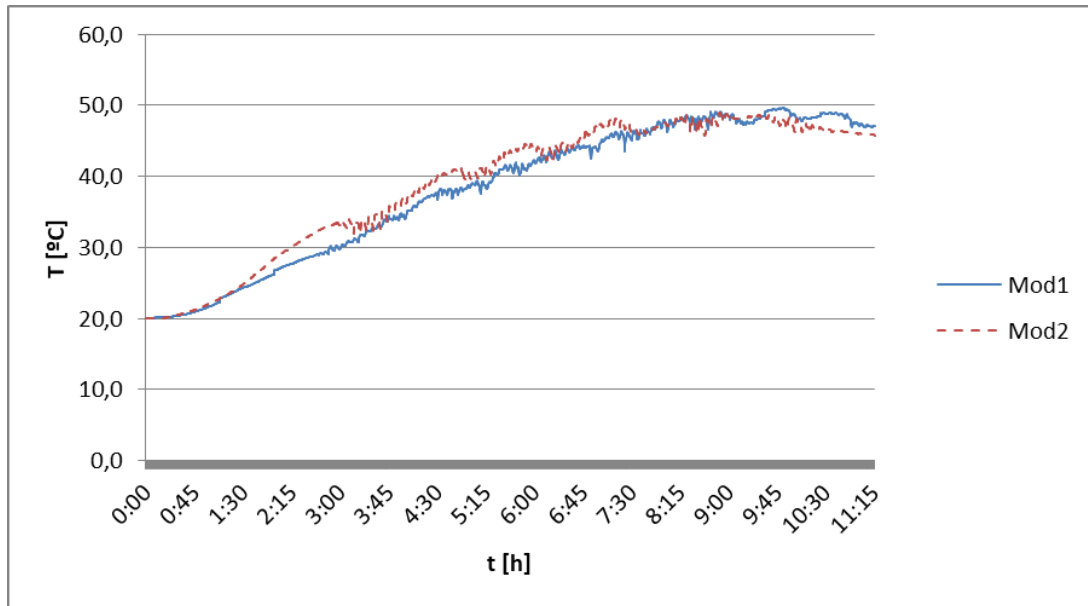


Figura 5.6 - Comportamento da temperatura de saída no inverno do Porto com duas placas

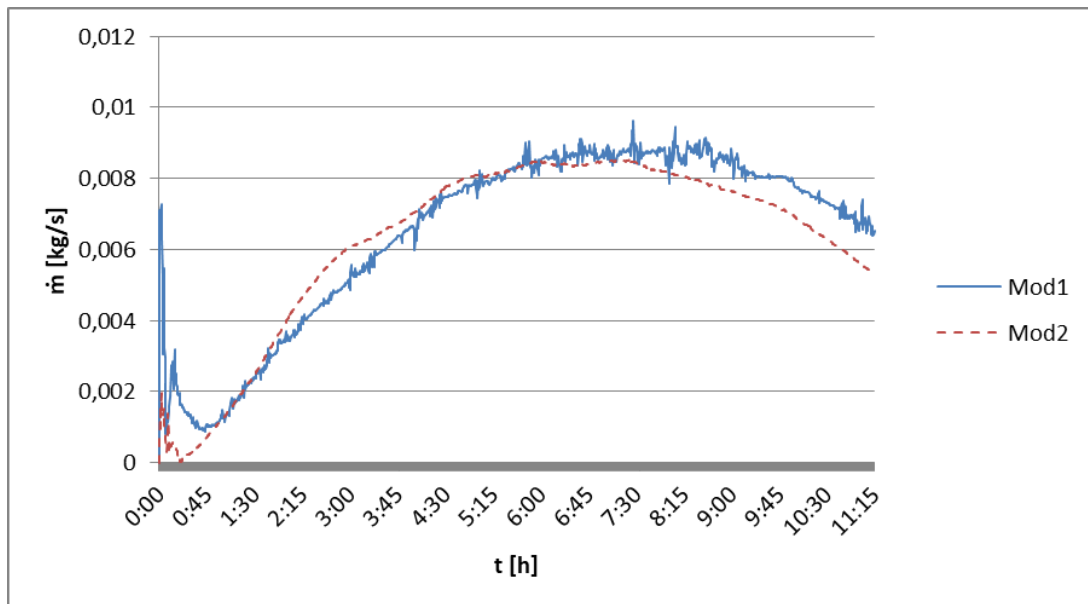


Figura 5.7 - Comportamento do caudal mássico no inverno do Porto com duas placas

Os dados coletados nesse sistema são exibidos na Tabela 5.1. O parâmetro que teve maior discrepância entre os modelos foi o caudal mássico, com cerca de 10% de diferença, existem dois motivos para essa diferença: o primeiro é que a área que recebe radiação solar do primeiro modelo é de 0,3 m² maior do que no segundo modelo, porém, a diferença é acentuada devido à instabilidade da medição do caudal no primeiro modelo, que pode ser observado na Figura 5.7. Além disso, como esperado, os coletores mantiveram comportamentos similares em todas as simulações.

Tabela 5.1 - Dados da simulação no inverno do Porto

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
1 placa	30,66	30,61	38,89	37,62	0,00618	0,00621
2 placas	40,08	39,77	49,63	48,96	0,00845	0,00852

5.2. Sistema em Fortaleza

O segundo sistema simulado foi para o inverno de Fortaleza, por ser o caso simulado no trabalho do Douglas [1] onde há a maior incidência solar. Foram feitas simulações utilizando os dois modelos de coletores desenvolvidos. O comportamento dos parâmetros analisados foi similar aos analisados no Porto. As curvas de Temperatura de uso, Temperatura na saída do coletor e caudal mássico do sistema com uma placa podem ser vistas nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 respectivamente, enquanto as Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 representam o comportamento dos parâmetros, na mesma ordem, do sistema com duas placas.

Assim, como as simulações realizadas para o inverno do Porto, os gráficos da Temperatura na saída do coletor e caudal mássico do primeiro modelo apresentam picos de instabilidade, que foram corrigidos nas simulações do segundo modelo com o refino da malha.

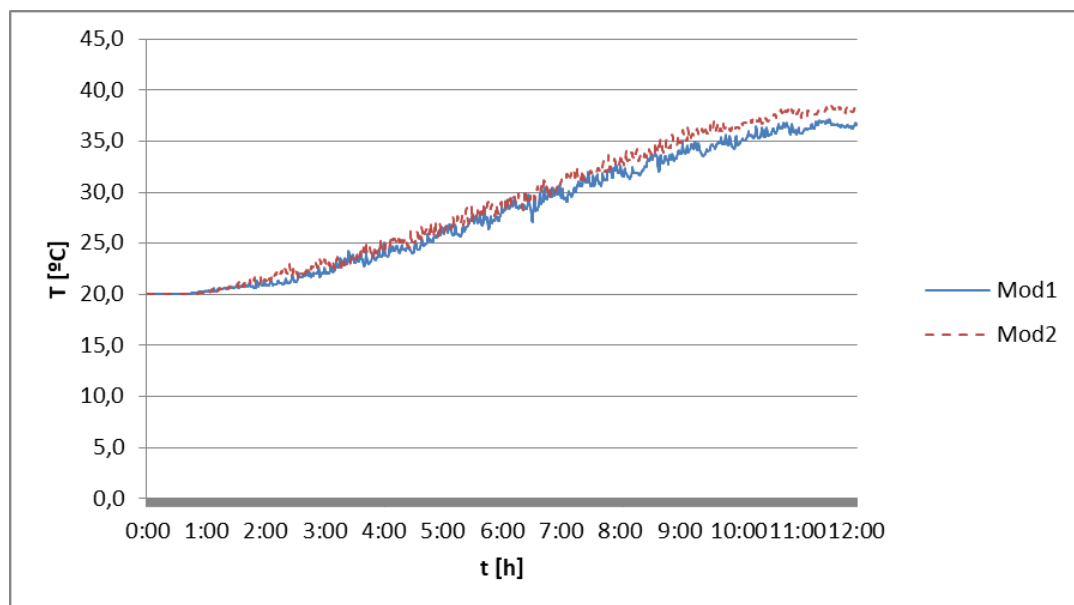


Figura 5.8 - Comportamento da temperatura de uso no inverno de Fortaleza com uma placa

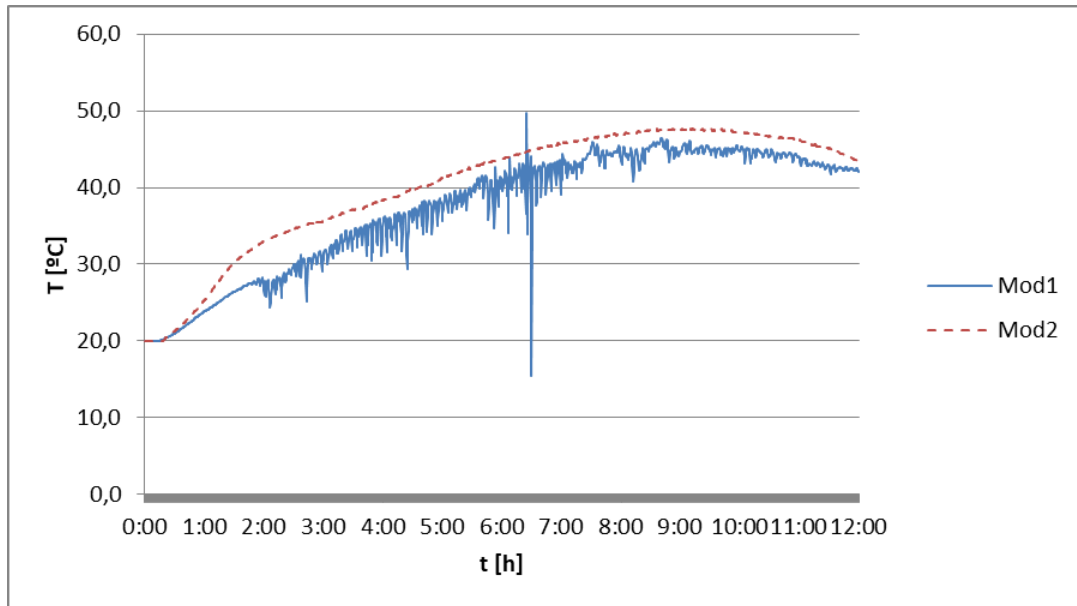


Figura 5.9 - Comportamento da temperatura de saída no inverno de Fortaleza com uma placa

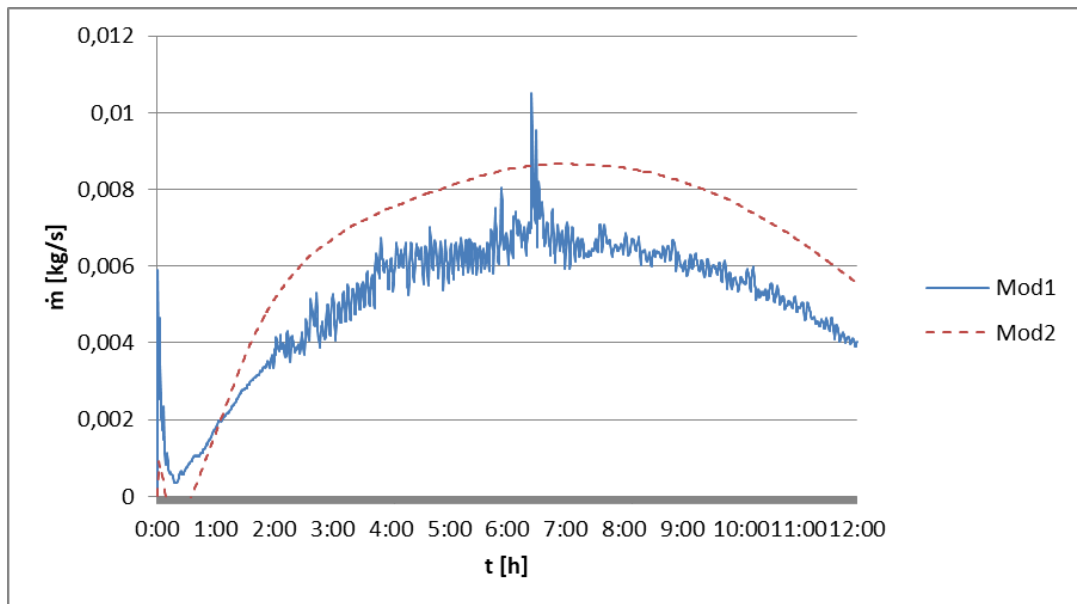


Figura 5.10 - Comportamento do Caudal mássico no inverno de Fortaleza com uma placa

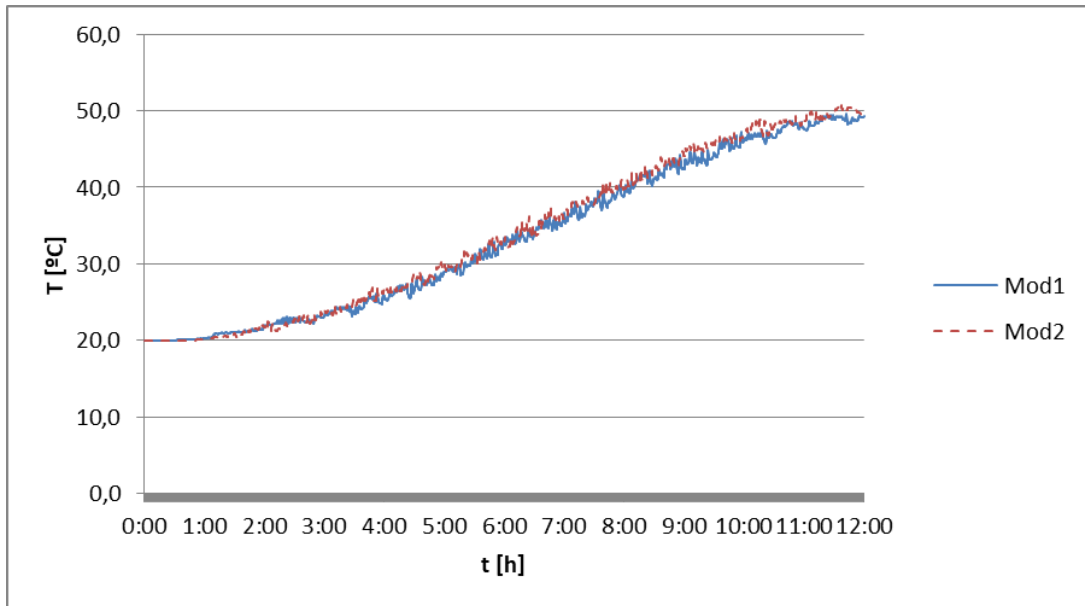


Figura 5.11 - Comportamento da temperatura de uso no inverno de Fortaleza com duas placas

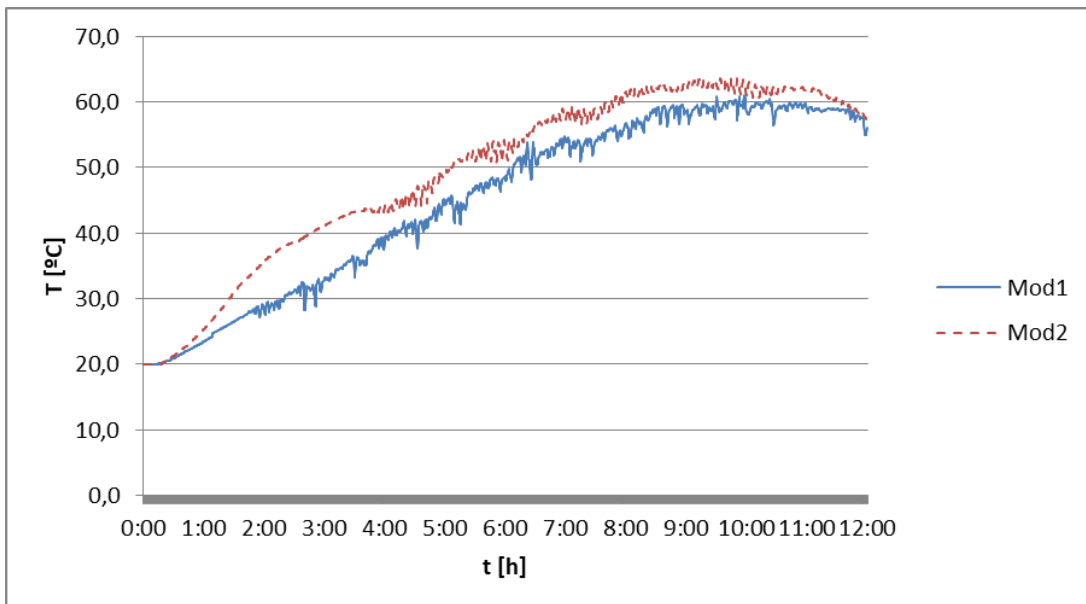


Figura 5.12 - Comportamento da temperatura de saída no inverno de Fortaleza com duas placas

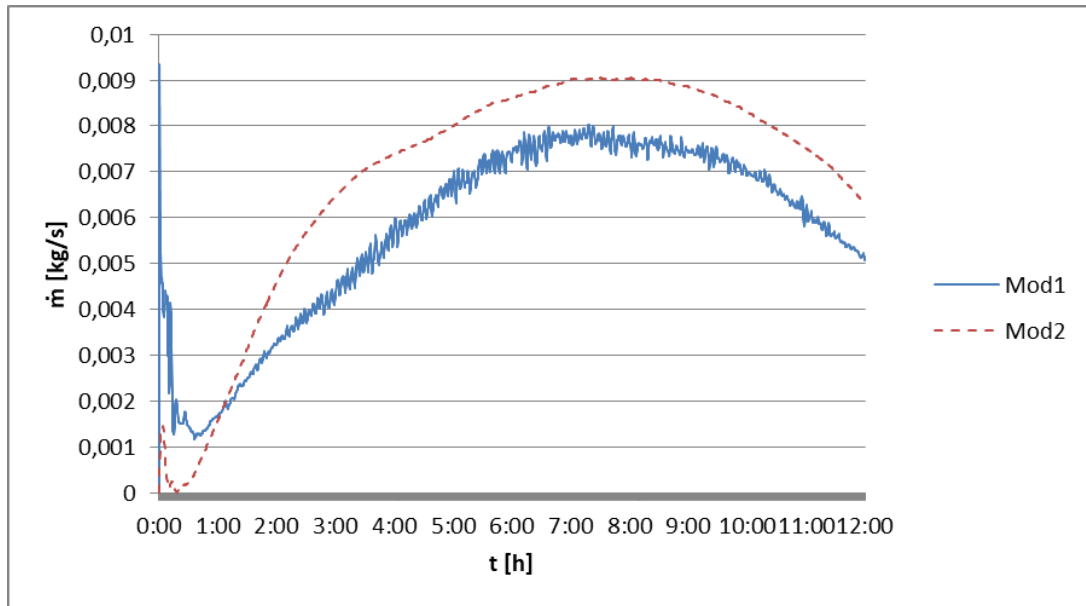


Figura 5.13 - Comportamento do Caudal mássico no inverno de Fortaleza com duas placas

Para o sistema com uma placa, a temperatura de uso ao final do dia foi de 37,10 °C no primeiro modelo e 38,12 °C no segundo. A temperatura na saída do coletor foi de 46,48 °C e 47,76 °C para o primeiro e segundo modelo respectivamente. O caudal mássico máximo foi de 0,00783 kg/s e 0,00868 kg/s em cada modelo, o que equivale a um caudal volumétrico de 28 L/h e 31 L/h.

No sistema com duas placas as temperaturas de uso alcançaram 49,26 °C e 49,72 °C, na saída do coletor a água chegou a 60,93 °C e 63,54 °C em suas temperaturas máximas, os maiores caudais mássicos e volumétricos foram de 0,00801 kg/s e 0,00905 kg/s, 29 L/h e 33 L/h. Sendo os primeiros valores para o primeiro modelo, seguidos dos valores do segundo modelo.

O sistema com uma placa seria suficiente para abastecer uma casa pelo sistema proposto, entretanto, como a simulação não considerou consumo de água e considerou o sistema adiabático, para uma situação real, é razoável considerar a instalação de duas placas.

A temperatura de saída máxima no sistema com duas placas foi de 60 °C, apesar de ser um valor menor do que o encontrado no estudo anterior, ainda é um valor alto e que deve ser levado em consideração, principalmente porque o material não aguenta temperaturas acima de 70 °C. Apesar das considerações mencionadas anteriormente, que diminuem a temperatura para uma situação real, esse valor foi calculado para o inverno, nas outras estações do ano esse valor tende a ser maior.

Existem algumas alternativas para solucionar esse problema, como aumentar o volume do reservatório para 300 litros, que o possibilita abastecer uma família com quatro pessoas.

Porém, para manter o sistema funcionando com essa configuração, sugere-se adicionar uma válvula na saída do tanque e a fechá-la nas outras estações do ano. Como o sistema foi projetado para ser de fácil instalação, outra sugestão é esvaziá-lo e retirar o coletor quando na época mais quente do ano.

A Tabela 5.2 resume os valores encontrados nas simulações de Fortaleza:

Tabela 5.2 - Dados da simulação no inverno de Fortaleza

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
1 placa	37,10	38,12	46,48	47,76	0,00783	0,00868
2 placas	49,26	49,72	60,93	63,54	0,00801	0,00905

5.3. Comparação com o modelo teórico

Foram comparados os dados obtidos neste trabalho com os do modelo teórico feito pelo Douglas [1]. A Tabela 5.3 compara os dados da proposta final deste trabalho, que será chamada de Modelo MO, com a versão proposta anteriormente, que será chamada de Modelo SC, para Porto e a Tabela 5.4 faz a mesma comparação para Fortaleza.

O principal parâmetro analisado neste projeto é a temperatura de uso ao fim do dia, afinal é esse valor que dirá o quanto o coletor foi capaz de aquecer a água. As simulações para o inverno do Porto tiveram resultados que podem ser considerados similares, visto que a diferença foi menor que 0,5 °C. Já nas simulações para o inverno de Fortaleza o Modelo MO foi mais eficiente com uma placa, aquecendo a água em 3°C a mais do que o Modelo SC, com duas placas a diferença foi de 0,6 °C, essa aproximação está relacionada com a montagem dos coletores e será discutida a seguir.

Tabela 5.3 - Comparação dos dados para o inverno do Porto

Sistema	T de uso [°C]		T de saída [°C]		Caudal mássico [kg/s]	
	Modelo SC	Modelo MO	Modelo SC	Modelo MO	Modelo SC	Modelo MO
1 placa	30,9	30,61	50,3	37,62	0,00363	0,00621
2 placas	40,2	39,77	72,4	48,96	0,00405	0,00852

Tabela 5.4 - Comparação dos dados para o inverno de Fortaleza

Sistema	T de uso [°C]		T de saída [°C]		Caudal mássico [kg/s]	
	Modelo SC	Modelo MO	Modelo SC	Modelo MO	Modelo SC	Modelo MO
1 placa	35,3	38,12	59,1	47,76	0,00409	0,00868
2 placas	49,1	49,72	91,1	63,54	0,00495	0,00905

Mesmo realizando alterações para facilitar e baratear a fabricação do coletor é possível notar que seu desempenho se manteve, visto que as temperaturas de uso mantiveram-se próximas ao final do dia. A principal diferença se dá na temperatura de saída e caudal mássico, como o Modelo MO consegue armazenar mais água em seu interior, seu caudal mássico é cerca de duas vezes maior e sua temperatura de saída é menor na casa dos 20%, essa foi uma boa mudança, pois mesmo com velocidade maior, ela não se aproximou do máximo para prejudicar a estratificação e aquece menos a água na saída, sendo menos agressiva ao coletor.

Além disso, nota-se que o modelo inicial possui uma maior diferença na temperatura de uso e, principalmente, na temperatura de saída do coletor entre os sistemas com uma e duas placas do que no modelo final, isso ocorre porque o sistema foi estudado anteriormente ligado em série e agora foi estudado ligado em paralelo. A escolha para ligá-lo em paralelo teve duas motivações: para não aumentar tanto a temperatura na saída e por ser mais fácil ligar o sistema em paralelo do que em série.

5.4. Análise da placa

Foi feita a simulação do coletor isolado para verificar sua eficiência. Foram utilizadas as condições climáticas para um dia de inverno no Porto e em Fortaleza, com velocidades constantes de 0,06 m/s, 0,04 m/s e 0,02 m/s e a água em 20 °C na entrada. As Figuras 5.14 e 5.15 exibem o quanto o coletor conseguiu aquecer a água ao decorrer do dia respectivamente para Porto e Fortaleza.

Nota-se que quanto menor a velocidade de entrada, a leitura da temperatura apresenta alguns picos fora da curva. Como o *Ansys* realiza seus cálculos através de métodos dinâmicos, uma hipótese é que as características do sistema proposto geram esses picos na curva de convergência. Essa hipótese ainda é evidenciada por esses picos aparecem em todas as curvas, eles são menores quando os valores em si são menores, mas logo em seguida eles são corrigidos de volta para a curva de convergência.

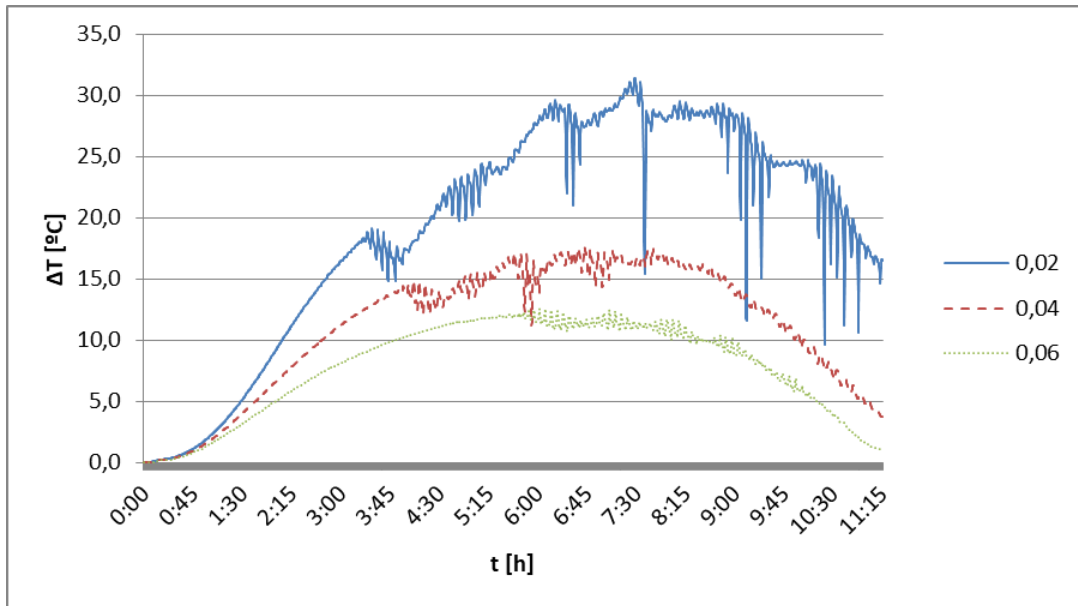


Figura 5.14 - Variação na Temperatura no Porto para as três velocidades de entrada analisadas

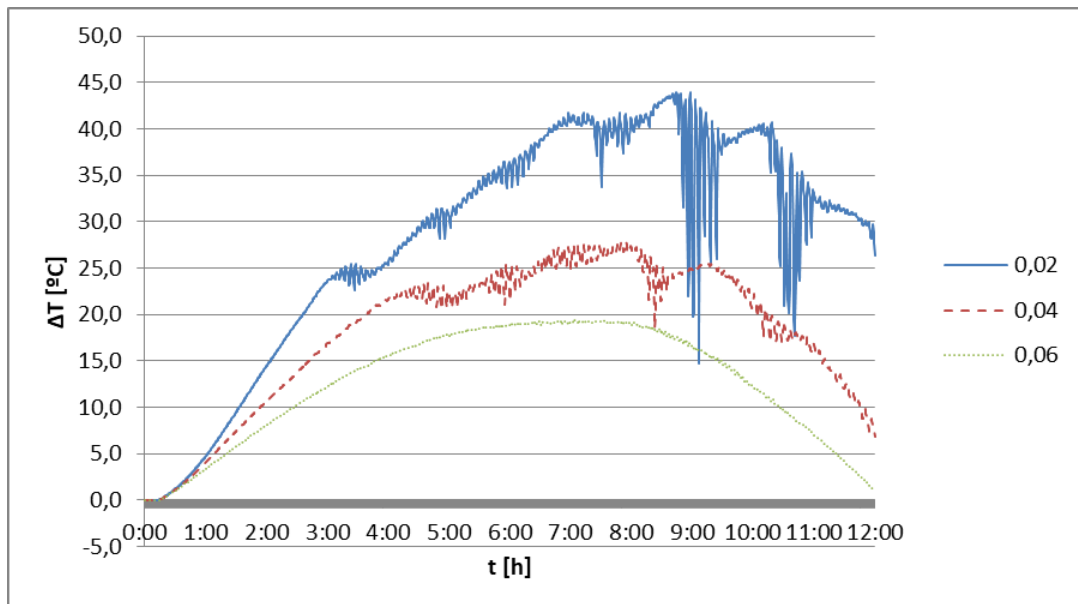


Figura 5.15 - Variação na Temperatura em Fortaleza para as três velocidades de entrada analisadas

A menor velocidade escolhida teve o melhor desempenho, conseguindo aquecer mais a água em ambos os casos. Aquecendo a água em 31,38 °C no Porto e 43,90 °C em Fortaleza. Portanto, percebe-se que a velocidade de escoamento do fluido exerce grande influência no desempenho do coletor, o que abre a possibilidade de alterar o projeto para gerar escoamentos mais lentos no sistema. Uma sugestão é aumentar o diâmetro dos tubos roscados para diminuir a velocidade do escoamento e verificar qual é seu impacto no comportamento do coletor.

Por fim, utilizando as equações 3.7, 3.12 e 3.13, foi possível calcular a eficiência do coletor após um dia de funcionamento. Com a velocidade de 0,02 m/s, a eficiência foi de 88%

para Porto e 89% para Fortaleza. Um detalhe é que a eficiência é tão elevada por causa das considerações feitas, que excluem as perdas de calor. A Tabela 5.5 exibe os valores da eficiência e temperatura da água aquecida para cada velocidade analisada.

Tabela 5.5 - Eficiência e picos de temperatura

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

5.5. Primeiro Protótipo

Na subseção 3.1.9, Fabricação do primeiro Protótipo, foram apresentados os elementos de construção do coletor. Após sua fabricação na fábrica da *FactoryPlay*®, o protótipo foi insuflado para se verificar a sua estrutura. A Figura 5.16 exibe o tamanho real do coletor e a Figura 5.17 representa-o insuflado. É possível perceber a proporção áurea do coletor e que ele está num tamanho que o permite ser maneável em ambas as imagens:



Figura 5.16 - Primeiro protótipo fabricado

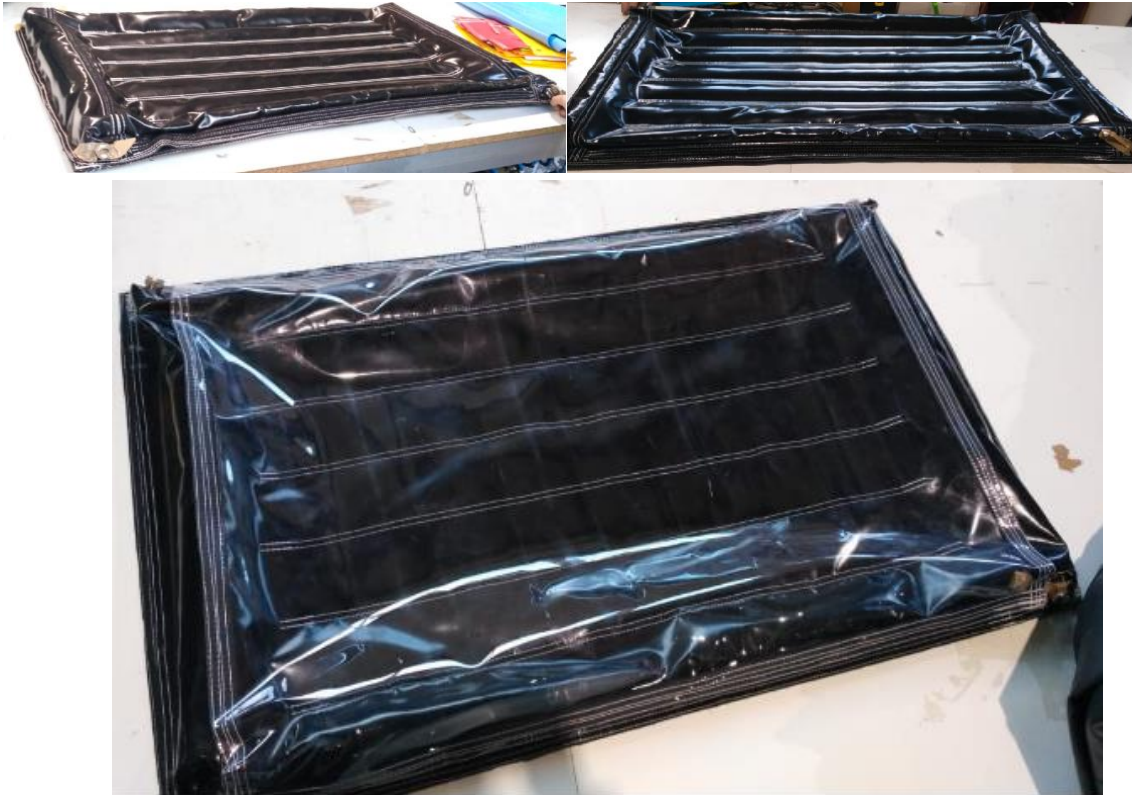


Figura 5.17 - Coletor insuflado

Para verificar a funcionalidade da capa da camada isolante, foi utilizado papelão para simular o isolamento. Diversos pedaços de papelão com espessura média de 18 mm foram colocados nesse compartimento e o coletor foi insuflado com eles, conforme apresentado na Figura 5.18.

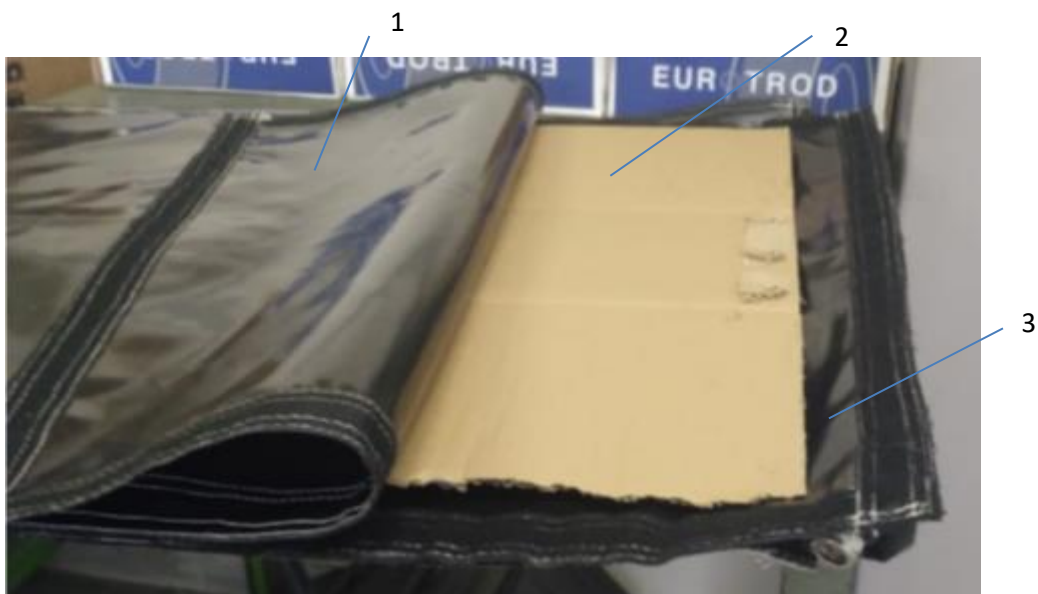


Figura 5.18 - Simulação de isolamento com papelão; 1- capa da camada isolante; 2- Papelão com 18 mm de espessura; 3- Placa absorvedora.

Verificou-se também se o coletor era de fácil transporte, tendo sido enrolado para simular seu transporte e armazenamento, como mostrado na Figura 5.19. O coletor pode até mesmo ser transportado dentro de um tubo:



Figura 5.19 - Coletor enrolado

5.6. Coletor otimizado

O segundo modelo desenvolvido nesse trabalho foi definido como coletor otimizado para ser fabricado. As mudanças neles foram feitas para torna-lo mais fácil e barato de ser produzido e as mudanças ocorreram apenas na placa absorvedora e as principais foram na quantidade de canais de aquecimento, acabamento das paredes laterais e a diferente de altura entre os canais de aquecimento e de distribuição/coleta. A seguir serão apresentadas as suas medidas e cálculos de resistências.

5.6.1. Medidas do modelo

As medidas externas mantiveram-se próximas da proporção áurea, com uma relação de 1,638. A altura nos canais de coleta/distribuição foi alterada para 30 mm, a mesma altura dos canais de aquecimento. Essa mudança ocorreu visto que os canais são cilíndricos, então eles já possuem espaço para abrigar o ar e possibilitar o efeito estufa e não há necessidade do espaço superior excedente, além disso, as paredes laterais foram retiradas, isso facilita as

etapas de corte e vulcanização, pois com a nova geometria só é necessário cortar duas folhas de lona e não é preciso unir a parede na folha superior e inferior, apenas uma folha na outra. O furo para conectar o coletor a sistemas externos é feito na folha superior.

A diminuição no número de canais de aquecimento de sete para cinco foi motivada pela dificuldade em realizar os cordões de vulcanização entre os canais, logo cada cordão a menos poderá gerar uma economia no custo de produção. Nesse modelo, cabem 2,52 litros de água em cada canal de abastecimento, o coletor cheio comporta os mesmos 18 litros de água e a placa possui 0,70 m² de área irradiada, ou seja, em termos gerais, não houve muita mudança entre os dois coletores estudados neste trabalho.

As tiras retangulares que recebem os ilhós foram inseridas nas extremidades dos eixos centrais de cada canal. Mesmo tendo um fator de segurança elevado, essa escolha foi tomada para dar estabilidade ao coletor quando fixado, visto ser produzido em material flexível. Por fim, o comprimento das tiras foi aumentado para 40 mm, possibilitando o utilizador de fixar o coletor com os ilhós na horizontal ou na vertical.

5.6.2. Dimensionamento estrutural

Com a geometria proposta de 10 ilhós, 5 em cada lado, com 20 mm de comprimento e considerando o caso do coletor estar apoiado apenas em um dos lados, o Fator de Segurança obtido foi de 20, o que indica que o coletor está bem calculado do ponto de vista da segurança e, apesar da fixação estar superdimensionada, o número de ilhós foi mantido para haver um ponto de fixação em cada canal de aquecimento. A memória de cálculo se encontra disponível no Apêndice A.

O cálculo da pressão hidrostática (Ph) foi feito para o caso mais grave e sem considerar nenhum apoio, com uma altura manométrica de 1809,28 mm, e foi considerada que essa pressão será exercida sobre os cordões de solda, a memória de cálculo também se encontra no Apêndice A:

$$Ph = 0,018 \text{ N/mm}^2$$

6. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de coletor solar flexível de baixo custo, de fácil transporte e instalação. A partir das simulações realizadas e do protótipo construído foi possível compreender o funcionamento do coletor.

A fabricação do coletor foi aperfeiçoada através da prototipagem, tornando-o mais simples e com menor custo de produção.

Após produzir o primeiro protótipo, algumas oportunidades de melhoria foram encontradas e foram propostas alterações, as mudanças que mais impactaram foram: a retirada das paredes laterais, possibilitando a placa absorvedora de ser fabricada com apenas duas folhas de lona, a diminuição dos canais de aquecimento de sete para cinco, eliminando a necessidade de realizar duas linhas de vulcanização.

O modelo otimizado desenvolvido tem as seguintes características:

- Coletor com três peças, sendo elas: cobertura transparente, placa dos canais e capa para isolamento;
- Cinco canais de aquecimento com área transversal semicircular com largura de 140 mm, altura de 30 mm e 900 mm de comprimento;
- Canais de coleta e distribuição com 80 mm largura e 30 mm de altura nas extremidades;
- Quatro tubos rosqueados utilizados para ligar o coletor em sistema, presos com cola vedante;
- Cinco tiras com ilhós em cada extremidade do coletor, centralizados em cada canal de aquecimento.

A utilização dos tubos rosqueados permite ligar o coletor a tubagens de um sistema externo, ou até mesmo ligá-lo a outros coletores em série ou paralelo, de acordo com a necessidade do projeto.

Os ilhós possuem um Fator de Segurança de 20, indicando que do ponto de vista de segurança o projeto está bem calculado e, portanto, podem ser utilizados posicionados na horizontal, para fixar o coletor, ou podem ser girado para a vertical e servir para inclinar o coletor, através de uma barra transpassada.

O coletor é fabricado em filme PU preto com proteção contra raios UV para a placa dos canais e capa para isolamento e filme PU transparente para a cobertura. Ele possui 0,70 m² de

área útil e comporta no máximo 18 litros de água, que será movimentada através do efeito de Termossifão.

A partir dos dados obtidos nas simulações realizadas, que consideram o consumo de água nulo e um reservatório suficiente para abastecer uma casa com duas pessoas, concluiu-se que no Porto é necessário um sistema de montagem paralela com dois coletores, que permitirá aquecer a água de uso até 39,77 °C ao fim do dia no inverno. Já para Fortaleza, o sistema com uma placa seria o suficiente para abastecer a residência, visto que conseguiu disponibilizar a água de uso em 38,12 °C ao fim do dia.

Os modelos clássicos de coletores solares têm eficiências médias um pouco superiores aos 70%, como o coletor estudado neste trabalho é simplificado com relação aos isolamentos térmicos, acredita-se que sua eficiência possa ficar na casa dos 60%. Então, ao considerar um cenário mais realista, onde existem perdas de calor e consumo de água durante o dia, concluiu-se que serão necessárias três placas para Porto e duas para Fortaleza, para o abastecimento de uma residência com duas pessoas.

Fortaleza foi a representante de cidades tropicais nesse estudo, locais onde provavelmente água quente só é utilizada no inverno. Na simulação foi visto que a água na saída do sistema com dois coletores ligados em paralelo chega a temperatura na ordem dos 60 °C durante o dia. Uma vez que o material só suporta temperaturas até 70 °C, o sistema com essas configurações não é recomendado para ser utilizado nas estações quentes de cidades tropicais. Para que esse coletor possa ser utilizado sob estas condições, é necessário instalar algum dispositivo no reservatório que, durante as estações quentes, aumente o volume de água em seu interior ou, uma vez que o sistema foi projetado para ter fácil instalação, outra sugestão é esvaziá-lo e retirar o coletor durante períodos com maior calor.

Ao calcular o quanto a placa consegue aquecer a água, percebeu-se que as velocidades interferem diretamente no desempenho do coletor. Ao diminuir a velocidade de 0,06 m/s para 0,02 m/s, a temperatura na saída do coletor aumenta 24,5 °C em Fortaleza e 18,8 °C no Porto, e os desempenhos do coletor foram respectivamente de 88% e 89% nestas cidades.

6.1. Trabalhos futuros

Para a continuação do projeto, propõe-se refazer os cálculos das simulações com as propriedades do filme de PU com proteção contra raios UV.

Alterar as condições de entrada e saída da placa para atingir diminuir a velocidade de escoamento do fluido.

Construir o coletor solar e testá-lo sob as condições de teste da norma EN 12975-2, juntamente com o reservatório.

Verificar a vida útil do coletor solar para condições climáticas de países com clima temperado e tropical.

Fazer uma avaliação financeira do projeto a fim de verificar viabilidade econômica da placa.

7. Referências Bibliográficas

- [1] Scaramelli, D. Estudo do desempenho de um Coletor Solar Flexível de baixo custo, Mestrado - IPB, 2018.
- [2] European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF), 2016. “Solar Thermal Markets in Europe - Trends and markets statistics 2015”.
- [3] Duffie JA, Beckman WA. Solar Engineering of thermal processes. 4th edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc; 2013.
- [4] EUROSTAT. Natural gas price statistics - Statistics Explained. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Natural_gas_price_statistics>. Acesso em: 22 mai. 2019.
- [5] INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Tabela de Consumo de Energia Elétrica - Chuveiros Elétricos, ed. 03/2016, Rio de Janeiro, 2016.
- [6] Belinazo, M.; Belinazo, H. Parâmetros do Aquecimento de Água em Chuveiros: Conforto e Energia, Vidya, n. 41, p. 175-192, 2004.
- [7] Weiss, W.; Bergmann, I.; Faninger, G. Solar heat worldwide: markets and contribution to the energy supply 2009 (Edition 2011). Gleisdorf: Institute for Sustainable Technologies, 2011.
- [8] Bhowmik, H.; Amin, R. Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector. Energy Reports. Volume 3, November 2017, Pages 119-123.
- [9] Mauthner, F., Weiss W., Spörk-Dür. M. “Solar Heat Worldwide - Markets and Contribution to Energy Supply”. International Energy Agency, Gleisdorf, Austria, 2016.
- [10] Bailey, William J. Solar Heater, USA, Serial No. 490,954. 1910.
- [11] Gough, E.; Irwin, P. Plastic Solar Heater, USA, Serial No. 117,535. 1963.

- [12] McColgan, J.; O'Brien, P. Portable Light Weight Solar Heater, USA, Serial No 641,740. 1975.
- [13] Christoffersson, L. Solar collector comprising a plurality of reflective strips or strips, Suécia, Serial No. SE402972B. 1977.
- [14] Barreto, C.; Lombargi, G.; Junior L. Coletor solar plano para aquecimento de fluidos, Brasil, Serial No. PI7703081. 1977.
- [15] Roark, C. Combination Solar Collector and Heat Eschanger, USA, Serial No. 709,379. 1978.
- [16] Crombie, T.; Crombie, L. Inflated Flexible Solar Collectors, USA, Serial No. 844,383. 1979.
- [17] De Paiva, J. Coletor solar de tela, Brasil, Serial No. PI8003028. 1980.
- [18] Zinn, M. Solar Thermosyphon Water Heater, USA, Serial No. 200,262. 1982.
- [19] Van Massenhove, F. Solar collector with integral heat storage - has curved rear wall concentrating rays onto storage reservoir, Bélgica, Serial No. 896.234. 1983.
- [20] Evans, J.; Hatman, J.; Clark, W. Solar energy collector, Reino Unido, Serial No. 8233492. 1983.
- [21] Moraes, R., Harwood, J. Um aquecedor solar de baixo custo. Acta Amaz. vol.17 Manaus, 1987.
- [22] Borges, T. Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água, Doutorado – Unicamp, 2000.
- [23] Ara, Paulo, et al. Influência de variações da espessura da placa e da quantidade de tubos no fator de eficiência de coletores solares planos para aquecimento de água. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, abril, 2018.
- [24] Jordan, Rodrigo, et al. Influência da vazão de água sobre o rendimento de um coletor solar plano construído em termoplástico. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.35, n.4, p.665-675, jul./ago. 2015.

- [25] Khedler, Nidhal. Experimental Evaluation of a Flat Plate Solar Collector Under Hail City Climate. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 8, No. 2, p2750-2754, 2018.
- [26] Bellos, Evangelos, et al. Thermal analysis of a flat plate collector with Solidworks and determination of convection heat coefficient between water and absorber. *Proceedings, 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Pau, France, 2015.
- [27] Sousa, Lays, et al. Avaliação de um Sistema de energia solar térmica para a substituição de chuveiro elétrico numa residência no município de Itajubá, Minas Gerais, Brasil. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, abril, 2018.
- [28] Pandey, Krishna, Chaurasiya, Rajesh. A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 67 p641–650, 2017.
- [29] Patkó, I.; Szeder, A.; Patkó, C. Evaluation the Impact Tilt Angle on the Sun Collectors, *Energy Procedia*, v. 32, p. 222-231, 2013.
- [30] Van Wylen, Gordon J, Borgnakke, Claus, Sonntag, Richard Edwin. *Fundamentos da Termodinâmica*, Blucher – 8ª Edição, 2013.
- [31] Incropera, Frank P, deWitt, David P. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*, LTC – 5ª Edição, 2009.
- [32] Stoecker, Wilbert F, Jones, Jerold W. *Refrigeração e Ar condicionado*, Mc Graw – 2ª Edição, 1999.
- [33] Çengel, Y. *Heat transfer: A Practical Approach*, 2. ed. Boston (Mass.): McGraw-Hill, 2002.
- [34] Siqueira, A. *Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento Solar para Água*, Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- [35] Cristofari, C. et al. Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector, *Solar Energy*, v. 72, n. 2, p. 99-112, 2002.

- [36] Armacell. HT/Armflex, Catálogo – Armacell Enterprise GmbH, Espanha, 2018.
- [37] WHO – World Health Organization. Fact Sheet No. 35: The Right to Water, Genebra, Suíça, 2010.
- [38] Jurado, D. Modelagem Dinâmica de um Sistema Solar Termossifão Usando Coletores Atmosféricos de Plástico, Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- [39] Rojas, D. et al. Thermal performance testing of flat-plate collectors, Solar Energy, v. 82, n. 8, p. 746-757, 2008.
- [40] Freegah, B. Design, Development and Optimisation of a Novel Thermo-syphon System for Domestic Applications, Doutorado – University of Huddersfield, 2016.
- [41] TELFOR. Coberturas/Capotas. Têxteis técnicos, 2019. Disponível em: <http://www.telfor.pt/_coberturas_capotas>. Acesso em: 20 mar. 2019.

Apêndice A - Memória de Cálculo

Cálculo da Resistência dos Olhais

Calcular o peso gerado pela água dentro do coletor

$$\begin{aligned} \text{Str} &:= 2800 \cdot \text{mm}^2 && (\text{Área transversal de um canal}) \\ \text{N_can} &:= 5 && (\text{Número de canais}) \\ \text{L_1} &:= 900 \cdot \text{mm} && (\text{Comprimento dos canais}) \\ \text{L_2} &:= 130 \cdot \text{mm} && (\text{Largura dos canais de coleta/distribuição}) \\ \text{h_1} &:= 30 \cdot \text{mm} && (\text{Altura dos canais de coleta/distribuição}) \\ \text{L_3} &:= 700 \cdot \text{mm} && (\text{Comprimentos dos canais de coleta/distribuição}) \\ \rho &:= 998.2 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} && (\text{Massa específica da água a } 20 \text{ }^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de água em um canal de aquecimento:} &&& \text{V_1} := \text{Str} \cdot \text{L_1} = 2.52 \text{ L} \\ \text{Volume de água dentro de todos os canais de aquecimento:} &&& \text{V_2} := \text{V_1} \cdot \text{N_can} = 12.6 \text{ L} \\ \text{Volume de água nos canais de coleta e distribuição:} &&& \text{V_3} := 2 \cdot \text{L_2} \cdot \text{h_1} \cdot \text{L_3} = 5.46 \text{ L} \\ \text{Volume total do coletor:} &&& \text{Vt} := \text{V_2} + \text{V_3} = 18.06 \text{ L} \end{aligned}$$

$$\text{Peso da água: } \text{W_agua} := \text{Vt} \cdot \rho = 18.027 \text{ kg}$$

Verificar dados do material

$$\sigma_{\text{rut}} := 1800 \cdot \frac{\text{N}}{5 \cdot \text{cm}} = 36 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Calcular o Fator de Segurança

O sistema é considerado erguido pelos olhais de modo que a força peso atue axialmente nos cordões das tiras (semelhante a uma cortina).

$$\begin{aligned} \text{L_tira} &:= 20 \cdot \text{mm} && (\text{Comprimento de cada tira}) \\ \text{N_tira} &:= 5 && (\text{Número de tiras}) \end{aligned}$$

$$\text{Fator de Segurança: } \text{FS} := \frac{(\text{N_tira} \cdot \text{L_tira} \cdot \sigma_{\text{rut}})}{\text{W_agua} \cdot g} = 20.363$$

Cálculo da Pressão Hidrostática

Calcular a Pressão Hidrostática para o pior cenário

$h_{\text{sis}} := 1809.29 \cdot \text{mm}$ (Altura manométrica do sistema para a inclinação do Porto)

Pressão hidrostática: $Ph := \rho \cdot g \cdot h_{\text{sis}} = 1.771 \times 10^4 \text{ Pa}$