



UNICESUMAR - UNIVERSIDADE DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E AGRÁRIAS CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PROTÓTIPO DIDÁTICO DE MOTOR STIRLING ACOPLADO A LENTE
PARABÓLICA**

ARISSA FUJISAKI

MARINGÁ – PR

2024

ARISSA FUJISAKI

PROTÓTIPO DIDÁTICO DE MOTOR STIRLING ACOPLADO A LENTE PARABÓLICA

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da UNICESUMAR – Universidade de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Fernando Pereira Calderaro.

MARINGÁ – PR

2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

ARISSA FUJISAKI

MOTOR STIRLING ACOPLADO A LENTE PARABÓLICA

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da UNICESUMAR – Universidade de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Fernando Pereira Calderaro.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof. (a): Dr. Fernando Pereira Calderaro.

Examinador Prof. (a):

Examinador Prof. (a):

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso tem por objetivo principal a elaboração de um protótipo didático do motor Stirling gama associado a um coletor parabólico, com ênfase na utilização de materiais recicláveis. O estudo aborda detalhadamente o dimensionamento do protótipo didático incluindo uma análise de rendimento, o qual alcançou uma porcentagem de 24,05%, parâmetro aceitável para motores Stirling de pequeno porte com materiais reaproveitados. Tendo em vista o cenário atual, é essencial destacar a crescente importância desse trabalho, uma vez que há a imprescindível necessidade de fontes de energia sustentável, e o motor Stirling é uma alternativa de produção de energia amigável, contribuindo para a supressão dessa demanda.

Palavras-chave: Motor Stirling; Gama; Coletor Solar; Energia sustentável.

ABSTRACT

The main objective of this course completion work is to develop a didactic prototype of the Stirling gamma engine associated with a parabolic collector, with an emphasis on the use of recyclable materials. The study addresses in detail the sizing of the didactic prototype, including a performance analysis, which reached a percentage of 24,05%, an acceptable parameter for small Stirling engines with reused materials. Given the current scenario, it is essential to highlight the growing importance of this work since there is a mandatory need for sustainable energy sources, and the Stirling engine is an alternative for producing environmental energy, contributing to the suppression of this demand.

Keywords: Stirling engine; Gamma; Solar Collector; Sustainable energy.

1. INTRODUÇÃO

Impacto ambiental e sustentabilidade são recorrentemente associados a obtenção de energia e utilização dos recursos mundiais, sendo ambos amplamente discutidos devido ao reconhecimento da gravidade da situação global. É de suma importância que a geração atual mitigue o uso dos recursos, explorados até esgotamento para desenvolvimento econômico e político, em virtude da possibilidade de um futuro para as próximas gerações.

Para alcançar a sustentabilidade, é fundamental que sejam realizados estudos e estratégias detalhadas, levando em consideração um planejamento minucioso a fim de promover a adoção e integração de fontes de energia renováveis, cujo principal objetivo seja reduzir ao máximo possível o impacto negativo sobre o meio ambiente (Jabari et al., 2020.). Por conta disso, este trabalho tem como enfoque o desenvolvimento do motor Stirling associado a um coletor solar parabólico, nomeado na literatura como *Dish-Stirling* (Zabalza, 2010).

A combinação de uma fonte energética limpa e abundante, como a solar, com um motor que não emite resíduos tem apresentado resultados promissores, colocando em evidência sua mecânica para estudo mundialmente, uma vez que, os também nomeados como motores de ar quente já apresentam melhor desempenho se comparados aos seus antecessores (Bhagat et al., 2016).

Nos protótipos mais simples o próprio ar é utilizado como fluído de trabalho, bastando uma diferença de temperatura para o seu funcionamento. Entretanto, em algumas aplicações que requerem altos níveis de rendimento, opta-se por utilizar o hélio ou hidrogênio devido à sua capacidade de transportar energia térmica de forma mais eficiente e oferecer menor resistência ao escoamento

Ademais, vale destacar que o motor Stirling opera como uma máquina de ciclo fechado com combustão externa, uma vez que o fluído nunca deixa o interior do dispositivo. Essa particularidade contribui significativamente para reduzir o desgaste das peças mecânicas em movimento, diminuindo a necessidade de lubrificação e, conseqüentemente, simplificando a manutenção do motor (Planas, 2018).

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho reside no desenvolvimento de um projeto que integre um sistema *Dish-Stirling*, caracterizado pela associação de um motor Stirling a um coletor parabólico realizando uma análise de rendimento através do software Matlab do protótipo educativo construído com materiais recicláveis.

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Durante a execução desse projeto, os seguintes objetivos específicos serão abordados:

- Planejar e executar o protótipo didático
- Analisar o rendimento do motor
- Discriminar o detalhamento técnico das peças que compõem o projeto

2. REFERENCIAL

2.1. CONTEXTO HISTÓRICO

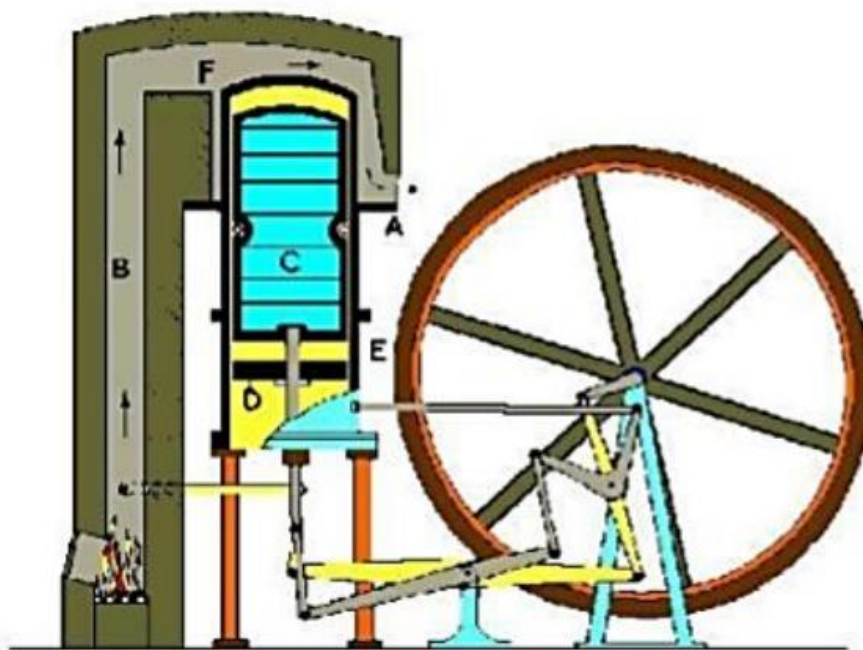
Ocorrido entre os séculos XVIII e XIX na Europa, a revolução industrial delineia um período caracterizado pela transição do trabalho artesanal para a utilização de maquinaria. O intuito subjacente ao desenvolvimento dessas máquinas era a amplificação da produção, consequentemente elevando os ganhos econômicos e minimizando a carga de trabalho humana (Magacho et al. ,2019).

A máquina que se revelou central durante a Revolução Industrial foi o motor a vapor, o qual exerceu uma função primordial ao tornar possível a operação de outras máquinas. É notável, nesse contexto, a importância de salientar a carência de mecanismos de regulação de pressão nas caldeiras, um desafio de grande magnitude, frequentemente resultando em rachaduras devido às pressões excessivas e consequentemente ocasionando em inúmeros acidentes gravíssimos (Magacho et al. ,2019).

Por conta disso, o pastor Robert Stirling com a idade de vinte e seis anos desenvolveu um motor de combustão externa e ciclo fechado, sendo o seu primeiro registro em 1816 com a patente nº 4081, documentando não somente a concepção e a implementação pioneira de um regenerador, mas também abordando de maneira detalhada suas principais aplicações (Barros, 2005). Na figura 1 é apresentado o motor Stirling pioneiro.

Devido à sua tolerância mais estreita em comparação com os motores de combustão interna, a fabricação dos motores Stirling exigia uma atenção especial. O declínio comercial dos motores Stirling ocorreu devido à combinação de um custo de fabricação inferior e uma capacidade de geração de potência maior nos motores de combustão interna (Barros, 2005).

Figura 1- Motor criado por Robert Stirling



Fonte: Finkelstein & Organ (2001)

Na figura 1, as letras BFA representam o percurso do fluido quente, D o pistão, C o cilindro interno e E a região fria.

2.2. MOTOR STIRLING

O conceito do motor Stirling é simples, composto por duas câmaras que apresentam uma diferença de temperatura entre si, esses cilindros operam em ciclos alternadamente aquecendo e arrefecendo um gás contido dentro deles. Essas variações de temperatura causam expansões e contrações no gás, resultando em movimentos oscilatórios dos pistões conectados ao eixo central do motor. (Byl, 2002).

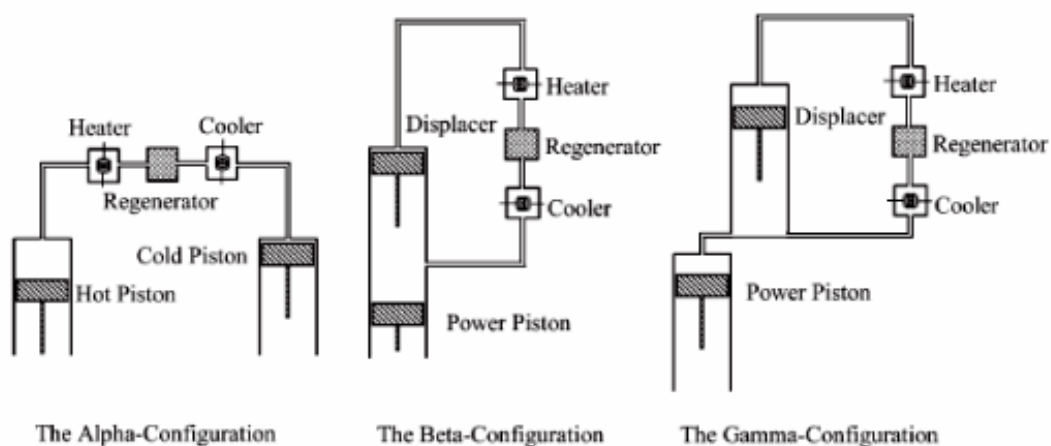
No decorrer dos anos, observa-se que três variantes relacionadas do motor Stirling, (figura 2), que persistiram no uso comercial contemporâneo, todos adotam a configuração convencional composta por pistão, virabrequim e cilindro, nomeadas como: Gama, Alfa e Beta (Foster, 2011). Na figura 2 são apresentadas as configurações do motor Stirling.

O motor Stirling Alfa consiste em dois cilindros com pistões e um virabrequim. Enquanto um cilindro representa o espaço de trabalho quente, o outro representa o frio (Foster, 2011). Esses pistões se movem uniformemente na mesma direção para fornecer volume constante no aquecimento ou resfriamento do fluido de trabalho, quando todo o fluido de trabalho foi transferido para um dos cilindros, um pistão será fixo enquanto o outro expande ou comprime o fluido. A expansão é realizada pelo pistão responsável pelo trabalho quente e a compressão pelo pistão de trabalho frio. (Bhagat et al., 2016).

Na configuração Beta, o pistão de potência e o êmbolo compartilham o mesmo cilindro e virabrequim (Foster, 2011). O êmbolo transfere o fluido entre o espaço de trabalho quente e frio do cilindro através do aquecedor, regenerador e resfriador. Localizado no espaço para baixa temperatura, o pistão de potência comprime o material e expande quando o mesmo se desloca para o espaço quente (Bhagat et al., 2016)

Já no modelo Gama, sua configuração não se difere muito do Beta, uma vez que, se utiliza dos mesmos padrões de movimentação entre as partes, apesar de não haver um compartilhamento do cilindro com o êmbolo (Foster, 2011). O êmbolo desloca o fluido de trabalho entre os espaços de alta e baixa temperatura por meio do aquecedor, regenerador e resfriador, nessa configuração o pistão de potência comprime e expande o gás. A configuração gama com pistão de dupla ação apresenta teoricamente maior eficiência mecânica e pressurização satisfatória. (Bhagat et al., 2016).

Figura 2- Configurações do Motor Stirling



Fonte: Bhagat et al., 2016

2.3. CICLO STIRLING IDEAL

O ciclo Stirling é semelhante ao de Carnot em alguns aspectos. O eixo que interliga os pistões pode ser considerado como uma “esponja” termal, a qual absorve e libera alternadamente o calor. No mesmo, apresenta-se uma câmara de expansão mantida a alta temperatura e uma câmara de compressão mantida a baixa temperatura, portanto, existe uma temperatura gradiente $T_{\max} - T_{\min}$, tal como no ciclo Carnot. (Walker, 1980). Conforme mencionado anteriormente, o seu ciclo é termodinamicamente reversível constituído de quatro fases:

Expansão Isotérmica: O ar presente no motor absorve calor da fonte externa, expandindo-se a temperatura constante.

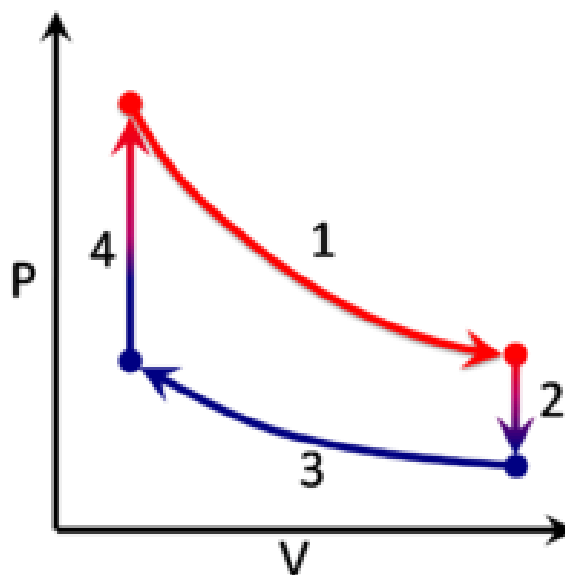
Resfriamento Isovolumétrico: O fluído do motor resfria-se por meio do ambiente.

Compressão Isotérmica: Com a compressão, o gás sofre aumento de pressão e temperatura.

Aquecimento isovolumétrico: O gás recebe calor da fonte externa á volume constante.

Na figura 3 é apresentado o ciclo Stirling ideal:

Figura 3 - Ciclo Ideal



Fonte: Planas (2018)

Na figura 3 pode-se observar as etapas do ciclo ideal sendo:

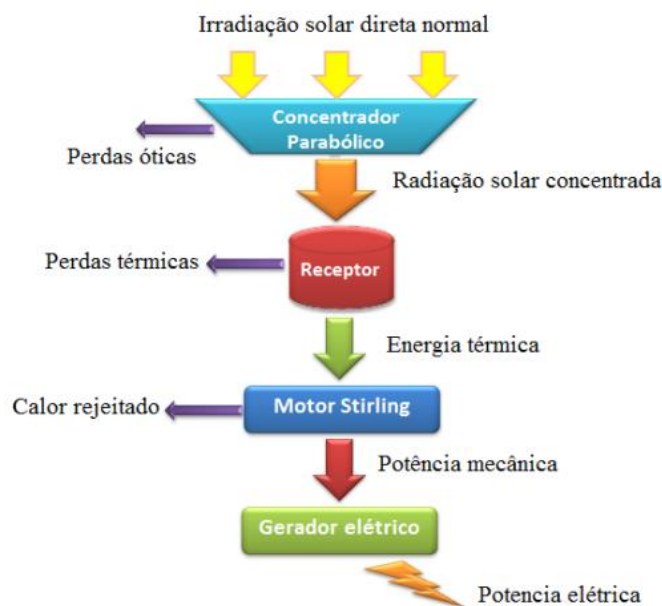
- 1 - 2 – Expansão isotérmica.
- 2 - 3 – Volume constante. Calor é transferido do fluido de trabalho.
- 3 - 4 – Compressão isotérmica
- 4 - 1 – Volume constante. Calor é transferido ao fluido de trabalho (Walker,1980).

2.4. MOTOR STIRLING E ENERGIA SOLAR

Os recursos renováveis de energia, tais como a energia eólica, energia hidráulica e energia solar, destacam-se atualmente como as alternativas mais populares entre as fontes limpas. Eles se caracterizam por empregar fontes naturais com a capacidade de regeneração, tornando-os definidos como inesgotáveis. Além disso, essas fontes reduzem o impacto ambiental e contornam a necessidade de utilização de matérias-primas não renováveis (Souza et al., 2019).

O sistema *Dish-Stirling* acopla um espelho coletor com controle de rastreamento solar, por conta disso, a radiação recebida é máxima na superfície. O mesmo é responsável por transferir a energia solar absorvida a um receptor, no qual, ocorre perdas ópticas em virtude do material escolhido. Por fim, a irradiação é direcionada ao fluido de trabalho (hélio, hidrogênio ou ar), transformando potência mecânica em elétrica (Dawi et al., 2018). Na figura 4 é apresentado um sistema *Dish-Stirling*.

Figura 4 - Funcionamento *Dish-Stirling*



Fonte: Dawi et al., (2011)

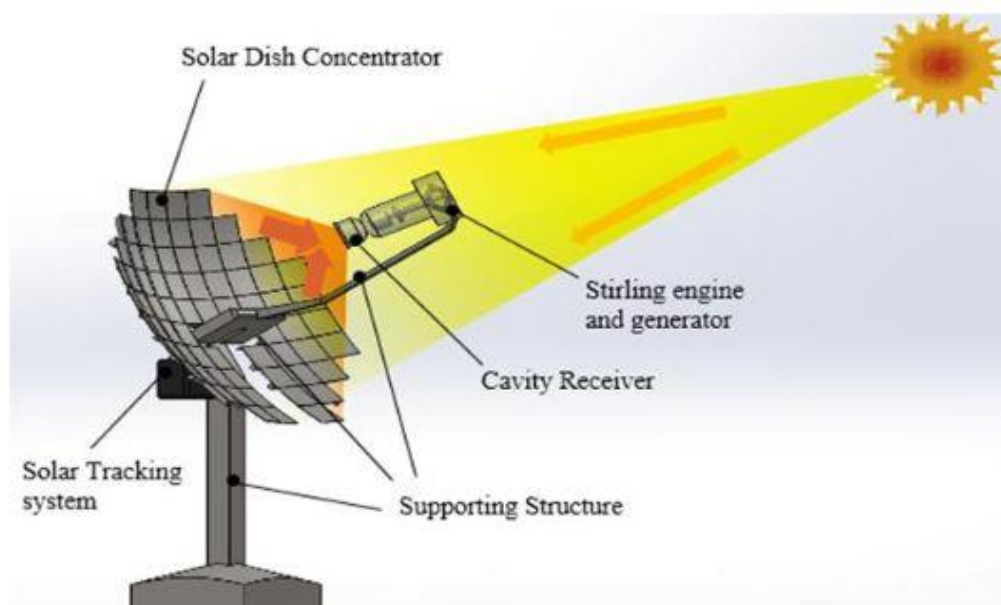
Para esse estudo, foi selecionado o motor Stirling do tipo Gama devido a sua menor complexibilidade de funcionamento e montagem. Além disso, há uma maior facilidade nesse modelo de se ajustar a taxa de compressão e de se obter transferência de calor. (Magacho et al., 2019).

No projeto será associado um concentrador solar parabólico que centraliza a energia em um único foco, com uma superfície revestida de material reflexivo de alta durabilidade. (Castellanos, 2012), esse concentrador será direcionado a câmara quente do Stirling, gerando a diferença de temperatura para o funcionamento dos ciclos descritos em 2.2.

2.5. COMPONENTES *DISH-STIRLING*

Composto por diferentes elementos. Na figura 5 são apresentados os principais componentes desse sistema.

Figura 5 - Componentes *Dish-Stirling*



Fonte: Ghafour, (2021)

2.5.1. CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO

O concentrador solar parabólico possui uma superfície reflexiva que reflete a radiação solar a um único foco, conforme figura 6. O seu tamanho é determinado levando em consideração a demanda de produção, região de instalação e dimensionamento das partes que

integram o sistema. Os capacitores são compostos por diversos materiais, como: alumínio, placas de plástico com fibra de vidro, polímero entre outros (Demeo et al., 1997).

Dentre as tecnologias de energia solar térmica, o sistema de captura solar parabólica demonstrou alcançar a mais elevada eficácia de transformação da energia solar em eletricidade, com índices oscilando entre 29% e 30%. Contudo, uma das principais limitações desta tecnologia reside na considerável despesa associada aos seus constituintes (Castellanos, 2012).

Figura 6 - Concentrador Solar Parabólico



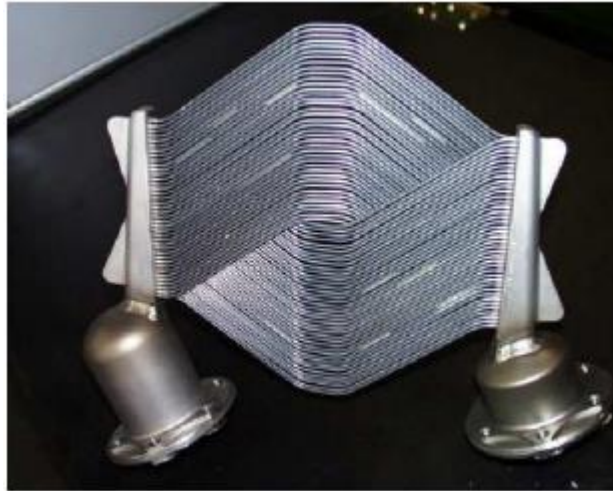
Fonte: Tessera Solar (2011)

2.5.2. RECEPTOR

O receptor interliga concentrador e motor, absorvendo energia do capacitor e transferindo para o fluído de trabalho, convertendo energia luminosa em térmica. Há dois tipos de receptores usualmente utilizados para esse fim, os de iluminação direta (DIR) e os de refluxo (Demeo et al., 1997).

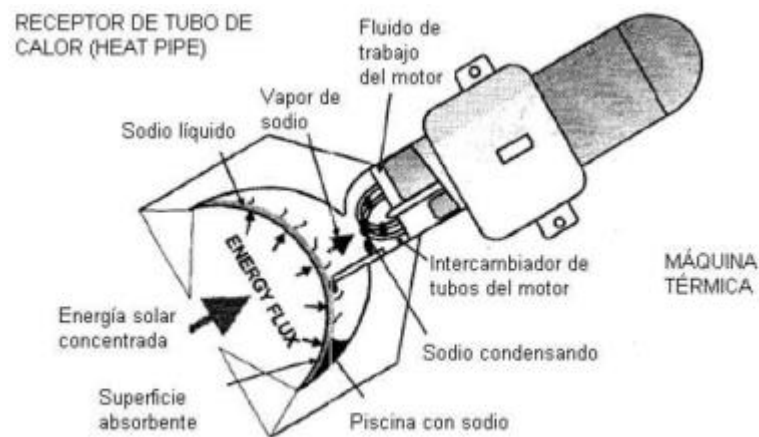
Os receptores DIR englobam uma estrutura microtubular de malha com pontos desiguais de temperatura, demonstrados na figura 7. Já os de refluxo, apresentado na figura 8, fazem uso de um fluído intermediário que se submete a repetidos ciclos de evaporação e condensação transferindo calor (Blasco, 2011).

Figura 7 - Receptor tipo DIR



Fonte: (Zabalza, 2011)

Figura 8 - Receptor de Refluxo

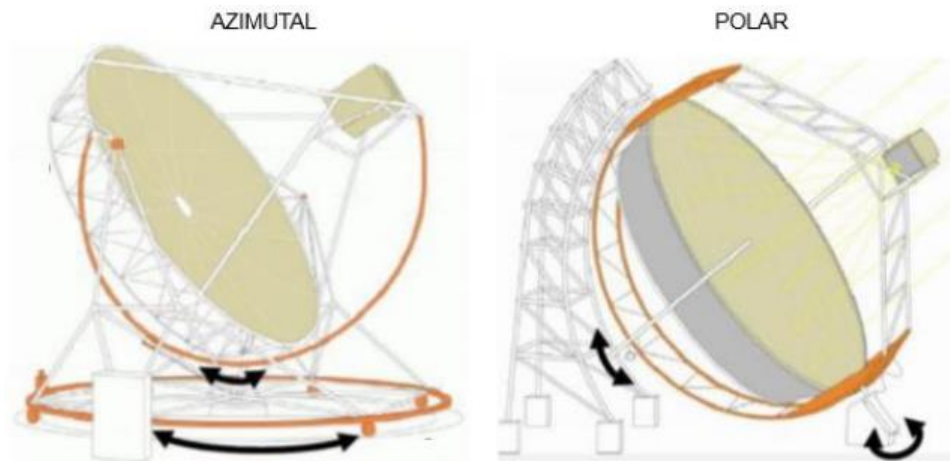


Fonte: (Zabalza, 2011)

2.5.3. SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

Para maximização de incidência dos raios solares, é necessário um sistema de rastreamento solar no *Dish-Stirling*, certificando-se que os raios incidam perpendicularmente na superfície do coletor (Keck e Schiel, 2002). É comumente utilizado o sistema de controle azimute e polar apresentados na figura 9. O primeiro possibilita o movimento paralelamente a Terra (azimute) e perpendicularmente a Terra (altitude), o segundo detém um eixo inclinado, com rastreamento em coordenadas polares. (Zabalza, 2011).

Figura 9 - Sistemas de Rastreamento Solar



Fonte: Dentello (2019)

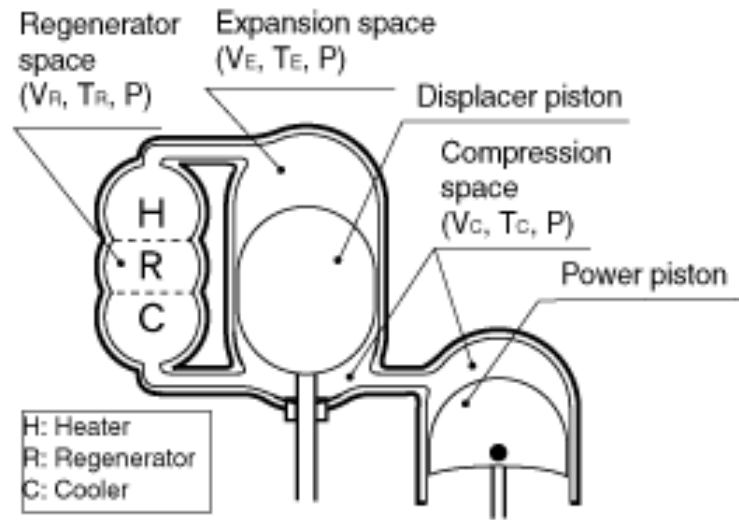
2.6. TEORIA DE SCHMIDT

Conhecido como uma análise clássica do motor Stirling, a teoria de Schmidt calcula o desempenho e perdas do modelo, sendo considerado um estudo mais realístico se comparado com o ciclo ideal (Rogdakis, 2002). Na figura 10 é apresentado o modelo gama de cálculo.

Por meio da representação gráfica do diagrama de Pressão-Volume (P-V), é possível adquirir a análise de eficiência do motor, levando em consideração suas configurações internas, massa do gás de trabalho e temperatura. Nesse contexto, torna-se viável estimar a pressão através da aplicação do método do gás ideal. Entretanto, essa abordagem demanda a definição prévia de alguns parâmetros (Hirata, 1995).

- Não há perda de pressão durante as trocas de calor, também não há pressões internas diferentes;
- O processo de expansão e compressão acontecem isotermicamente;
- O gás de trabalho deve ser considerado ideal;
- Há um regenerador perfeito;
- O volume morto de expansão mantém a temperatura do gás de expansão (T_e), o volume morto de compressão mantém a temperatura de compressão do gás (T_c);
- A temperatura do regenerador é uma média aritmética das temperaturas dos cilindros de expansão (T_e) e de compressão (T_c);
- O volume de expansão (V_e) e de compressão (V_c) variam de acordo com uma curva senoidal.

Figura 10 - Modelo Gama de Cálculo



Fonte: Hirata (1995)

O volume de expansão momentâneo (V_E) e o volume de compressão momentâneo (V_C) são descritos na equação (1) e (2) respectivamente. Sendo V_E em relação ao volume percorrido pelo pistão no cilindro de expansão (V_{SE}), e volume morto do cilindro de expansão (V_{DE}). O volume de compressão (V_C) é definido em função do volume percorrido pelo pistão no cilindro de compressão (V_{SC}), volume morto do cilindro de compressão (V_{DC}), e ângulo ($-dx$) entre pistão de deslocamento e de potência (Hirata, 1995).

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + V_{DE} \quad (1)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos(x - dx)) + V_{DC} \quad (2)$$

O volume momentâneo total (equação 3) é adquirido através da soma de volume de expansão momentâneo (V_E), volume do regenerador (V_R) e volume de compressão momentâneo (V_C) (Hirata, 1995).

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (3)$$

Conforme elucidado por Hirata (1995), é possível calcular a pressão interna do motor (P) com base na pressão média, pressão mínima ou pressão máxima, seguindo a formulação presente na equação 4.

$$P = \frac{P_{méd}\sqrt{1-c^2}}{1-c*\cos(x-a)} = \frac{P_{mín}(1+c)}{1-c*\cos(x-a)} = \frac{P_{máx}(1-c)}{1-c*\cos(x-a)} \quad (4)$$

Considerando algumas simplificações, temos:

$$t = \frac{Tc}{Te} \quad (5)$$

$$V = \frac{Vsc}{Vse} \quad (6)$$

$$Xde = \frac{Vde}{Vse} \quad (7)$$

$$Xdc = \frac{Vdc}{Vse} \quad (8)$$

$$Xr = \frac{Vr}{Vse} \quad (9)$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad (10)$$

$$S = t + 2tXde + \frac{4tVr}{1+t} + v + 2Xdc + 1 \quad (11)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (12)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (13)$$

A energia indicada para o volume de expansão (E_E) e compressão (E_C) é calculada é função da pressão média ($P_{méd}$), pressão mínima ($P_{mín}$) e pressão máxima ($P_{máx}$) descritas nas equações abaixo:

$$Ee = \oint PdVc = \frac{Pméd * VSE * \pi c * sen(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (14)$$

$$Ee = \oint PdVc = \frac{Pmín * VSE * \pi c * sen(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} * \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad (15)$$

$$Ee = \oint PdVc = \frac{Pmáx * VSE * \pi c * sen(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} * \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (16)$$

$$Ec = \oint PdVc = -\frac{Pméd * VSE * \pi ct * sen(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (17)$$

$$Ec = \oint PdVc = -\frac{Pmín * VSE * \pi ct * sen(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} * \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad (18)$$

$$Ec = \oint PdVc = -\frac{Pmáx * VSE * \pi ct * sen(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} * \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (19)$$

A energia total indicada (E_T) para um ciclo completo é obtida ao somar a energia indicada da fase de expansão (E_E) com a energia indicada da fase de compressão (E_C)

$$Et = EE + EC \quad (20)$$

A potência indicada de expansão (P_E), a potência indicada de compressão (P_C) e potência indicada total (P_T) são determinadas ao multiplicar as energias correspondentes pela taxa de rotação do motor (N), conforme equações 21,22,23.

$$Pe = Ee * N \quad (21)$$

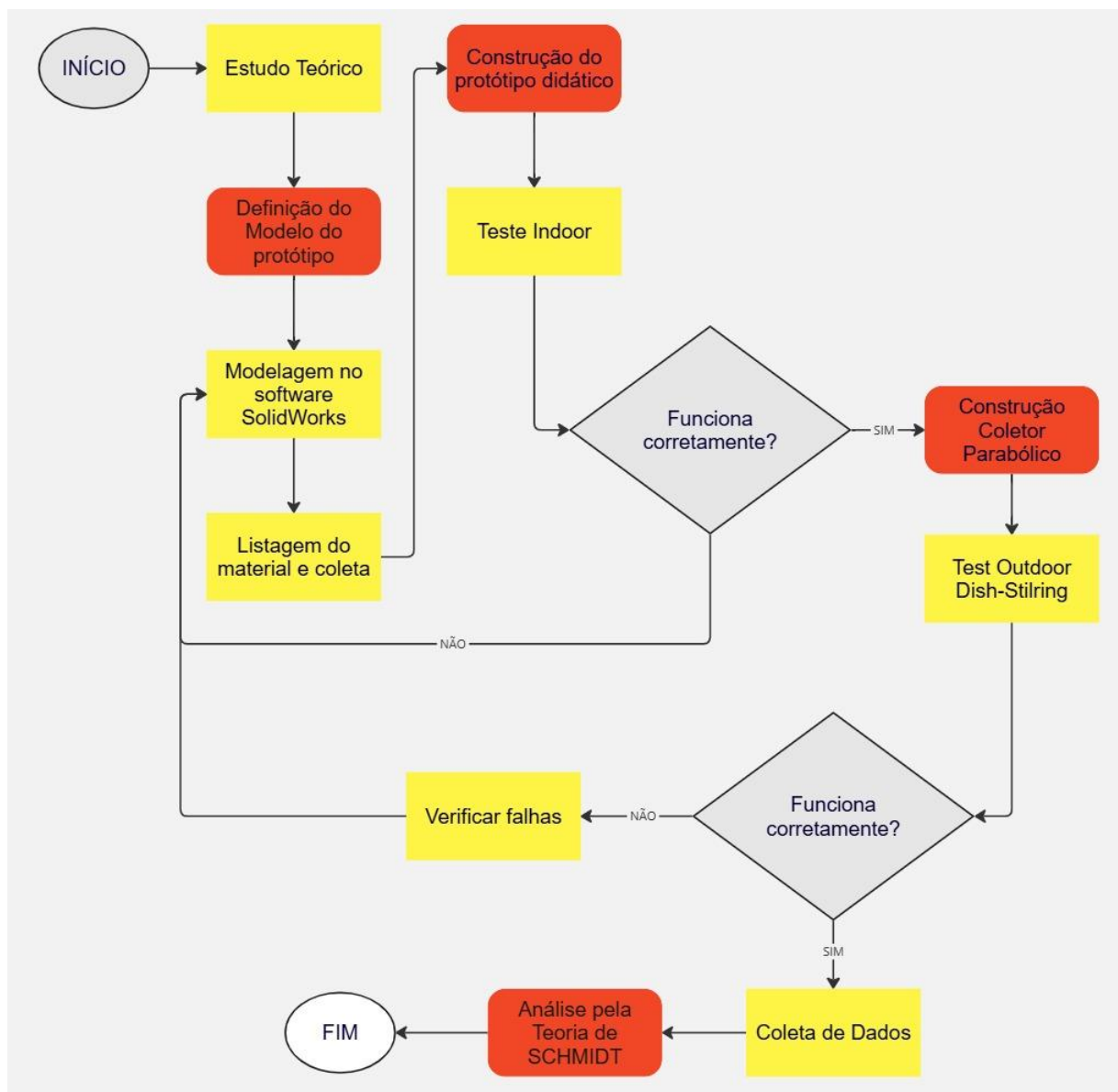
$$Pc = Ec * N \quad (22)$$

$$Pt = Et * N \quad (23)$$

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será realizado o desenvolvimento do protótipo didático do motor Stirling Gama com materiais recicláveis. Para tanto, este projeto tem como ponto de partida a análise do rendimento do motor através da coleta de dados da temperatura na câmara quente, na câmara fria, da rotação alcançada e geometrias, levando em consideração o ar como fluido de trabalho. Na figura 11 é esquematizado a metodologia utilizada. A partir da modelagem no software SolidWorks, os materiais foram listados e coletados para montagem.

Figura 11 – Fluxograma Metodologia Aplicada



Fonte: Autor (2024).

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais e instrumentos utilizados com detalhamento de custo estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Lista de Materiais

Item	Descrição	Quant.	Un	Origem	Custo (R\$)
Cotovelo soldável	90x20mm	1	un	Comprado	0,90
Silicone	Alta temperatura	50	g	Comprado	10,90
Lixa d'água	080	1	un	Comprado	2,20
Conector plástico	16mm	1	un	Comprado	2,00
Arame galvanizado	2,11mm	1	Kg	Comprado	25,00
Cola ultra rápido	CibraBond	1	un	Comprado	9,00
Madeira	10x10xØ55	1	un	Reciclado	0,00
Lata extrato de tomate	350g	1	un	Reciclado	0,00
Lata refrigerante	220ml	2	un	Reciclado	0,00
Lata milho em conserva	280g	1	un	Reciclado	0,00
Palito de pirulito	-	3	un	Reciclado	0,00
CD	-	2	un	Reciclado	0,00
Tampa caixa de leite	-	2	un	Reciclado	0,00
Balão	6,5"	1	un	Reciclado	0,00
Lata desodorante	150ml	1	un	Reciclado	0,00
Pote Iogurte	-	1	un	Reciclado	0,00
Bicarbonato de Sódio	-	50	g	Reciclado	0,00
Esponja de aço	Bombril	2	un	Reciclado	0,00

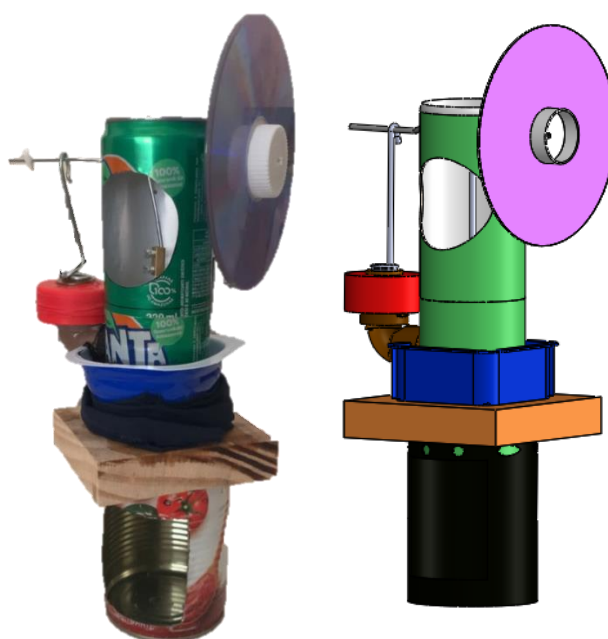
Óleo lubrificante	WD-40	1	un	Emprestado	0,00
Alicate de corte	Precisão	1	un	Emprestado	0,00
Óleo lubrificante	WD-40	1	un	Emprestado	0,00
Alicate universal	8	1	un	Emprestado	0,00
Chave de fenda	-	1	un	Emprestado	0,00
Tesoura	-	1	un	Emprestado	0,00
Estilete	-	1	un	Emprestado	0,00
Papel alumínio	-	1	rl	Emprestado	0,00
TOTAL					50,00

Fonte: Autor (2024).

4.2. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Na construção do protótipo do motor Stirling Gama foi necessária a reestruturação de todos os componentes internos devido a falhas de alinhamento na primeira montagem, sendo que, alguns constituintes demandaram remodelagem por diversas vezes, pois, o sistema não podia apresentar excesso de atrito ou falta de isolamento. Na figura 12 é apresentado o modelo piloto do protótipo no projeto e na montagem.

Figura 12 - Modelo piloto do protótipo



Fonte: Autor (2024).

4.2.1. ZONA QUENTE

Para a confecção da zona quente, figura 13, uma lata de extrato de tomate de 350g foi cortada com 8 furos na parte superior e em um retângulo de 50x65mm na posição central da peça. Acima dessa zona uma madeira de 10x10xØ55 é posicionada, de forma que, isole o calor para os demais componentes.

Figura 13 - Zona quente

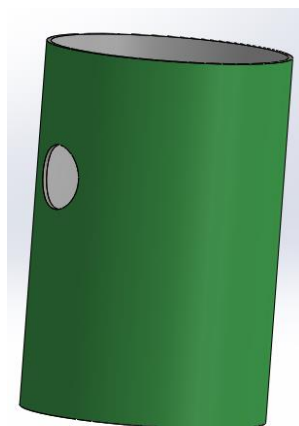


Fonte: Autor (2024).

4.2.2. ZONA TROCA DE CALOR

Uma lata de 220ml de refrigerante foi confeccionada para a zona de troca de calor, figura 14, dentro dela, localiza-se o pistão de deslocamento e saída de Ø15mm para a zona de compressão e expansão, neste local, é acoplado o cotovelo de 20mm. A lata foi reduzida em sua altura, totalizando ao final 85mm.

Figura 14 - Zona troca de calor

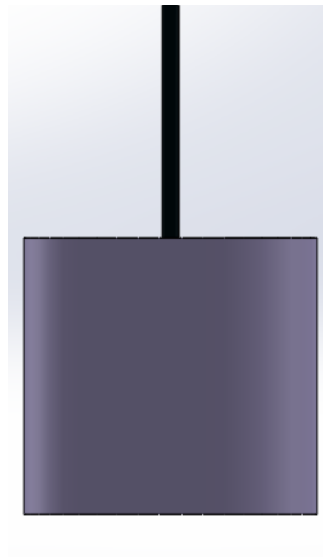


Fonte: Autor (2024).

4.2.3. PISTÃO DE DESLOCAMENTO

Um arame de aço galvanizado foi moldado para a estrutura de um pistão, o bloco cinza na figura 15 representa a esponja de aço fixada no arame.

Figura 15 - Pistão de deslocamento

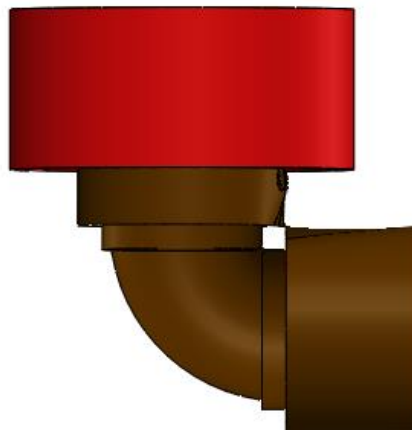


Fonte: Autor (2024).

4.2.4. ZONA DE EXPANSÃO E COMPRESSÃO

Um cotovelo de 20mm é instalado na saída da zona de troca de calor e acoplado a uma lata de desodorante cortada em 20mm de altura com um furo no centro de 15mm. O pistão de trabalho é encaixado acima dessa zona de expansão e compressão, figura 16.

Figura 16 - Zona de expansão e compressão



Fonte: Autor (2024).

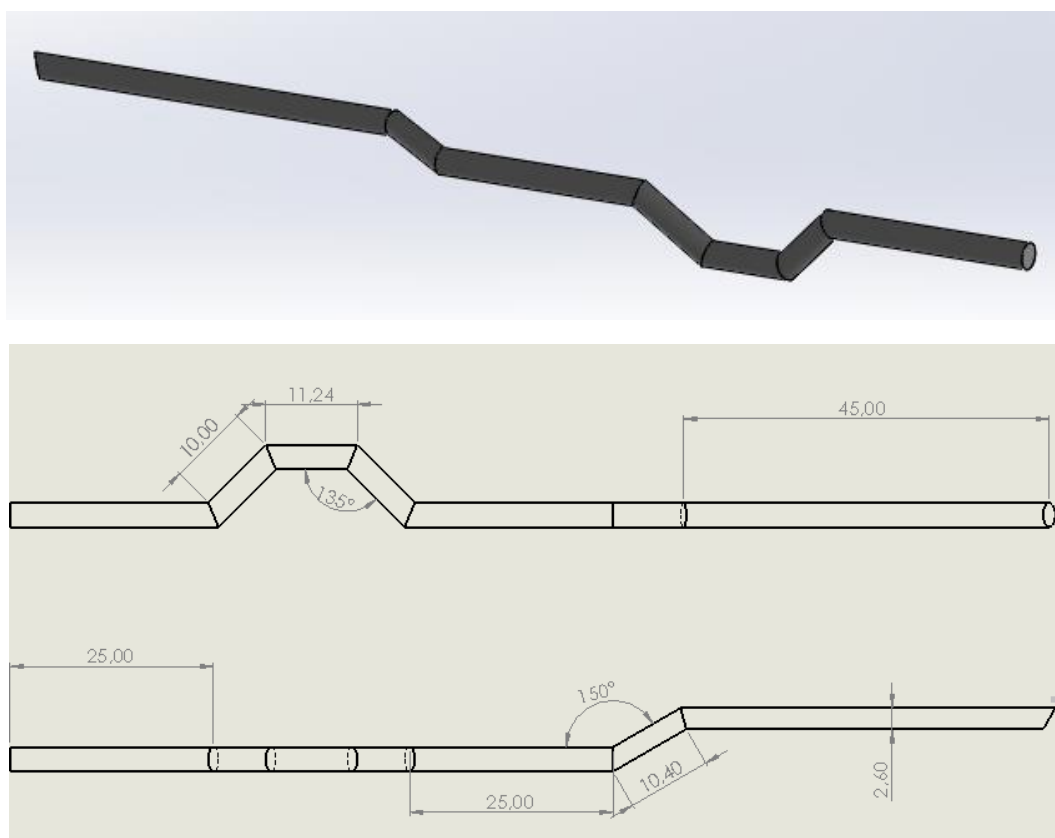
4.2.5. PISTÃO DE TRABALHO

Para a confecção do pistão de trabalho foi preciso um balão de látex de 6,5”, uma moeda de 20mm e biela B apresentada no tópico 4.2.6. O balão foi conectado na parte superior da zona de expansão e compressão, a moeda foi colada no centro do balão para junção com a biela B.

4.2.6. VIRABREQUIM E BIELAS

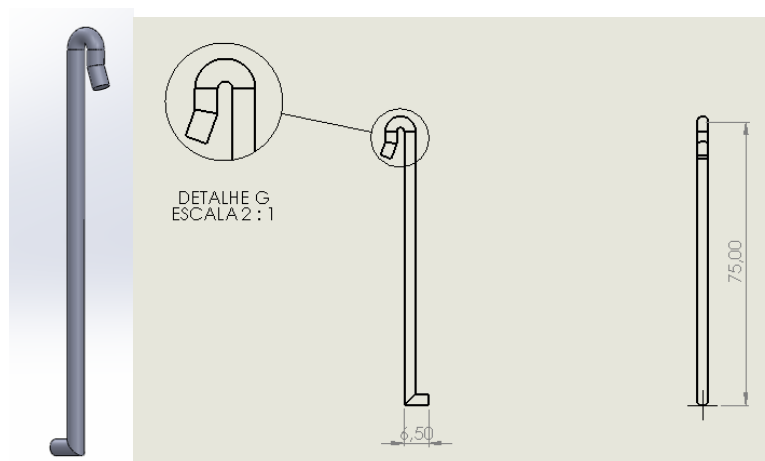
Para o virabrequim e bielas foi utilizado um arame de aço galvanizado elaborado com as dimensões necessárias para cada item por meio de um alicate universal. Nas figuras 17, 18 e 19 são representados respectivamente.

Figura 17 - Virabrequim



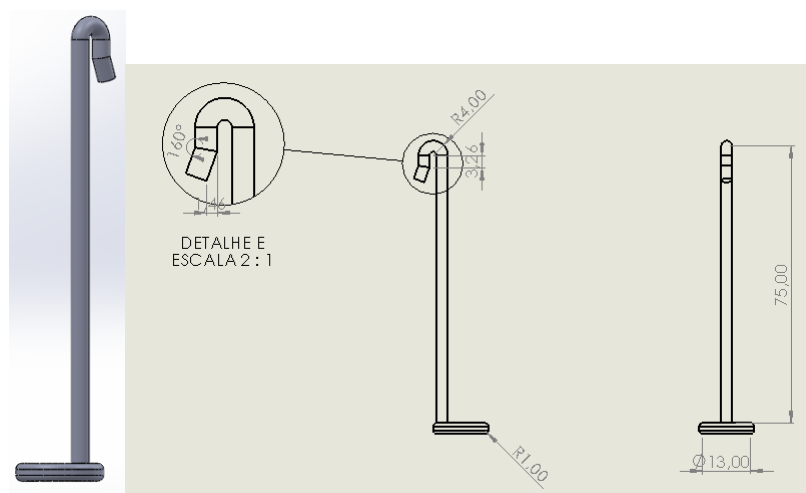
Fonte: Autor (2024).

Figura 18 - Biela A



Fonte: Autor (2024).

Figura 19 - Biela B

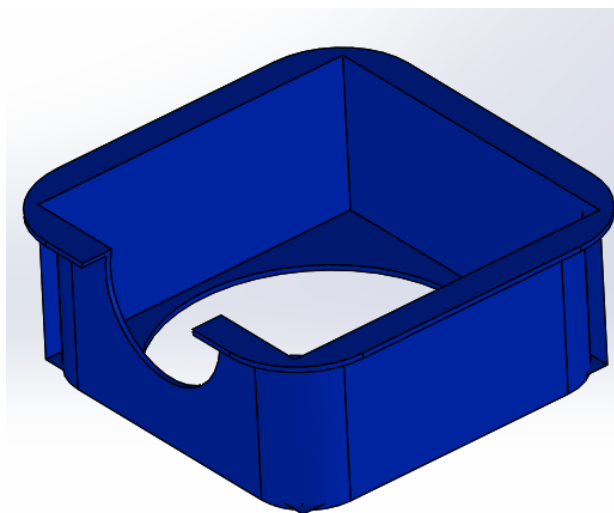


Fonte: Autor (2024).

4.2.7. ZONA FRIA

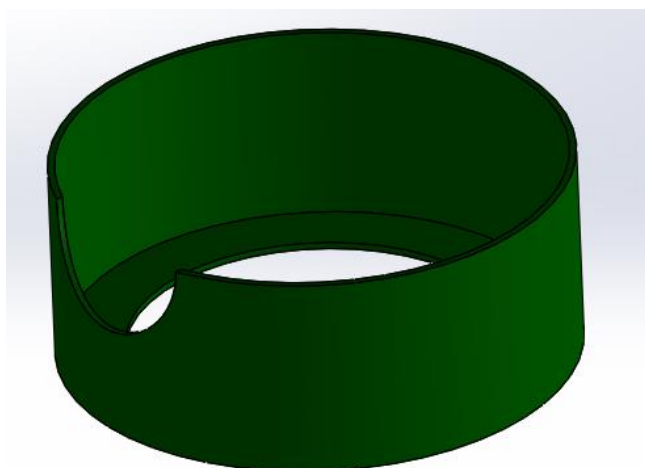
Após a finalização das partes e testes foi indispensável uma melhoria na zona fria, a princípio composta por um pote de iogurte, figura 20, o mesmo não apresentou boa isolamento para a água de resfriamento e estabilidade do protótipo, por conta disso, houve a substituição por uma lata de milho, figura 21, cortada com 30mm de altura e furo com Ø28mm para encaixe na parte externa da zona de troca de calor. O protótipo final é apresentado na figura 22.

Figura 20 - Zona fria (pote de iogurte)



Fonte: Autor (2024).

Figura 21 - Zona fria (lata de milho)



Fonte: Autor (2024).

Figura 22 - Protótipo pós-melhoria

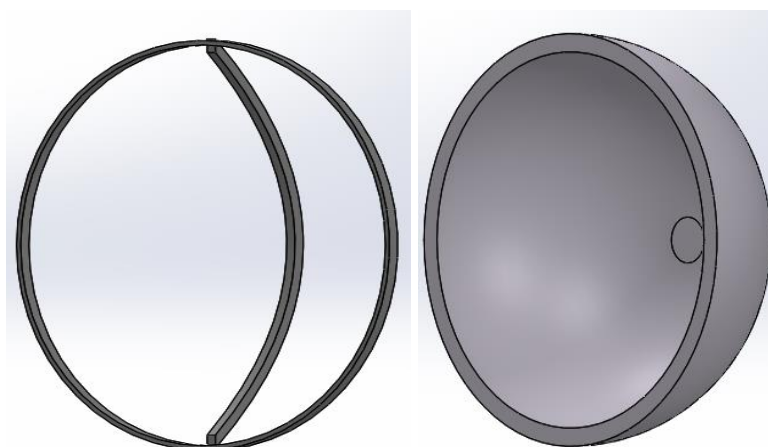


Fonte: Autor (2024).

4.2.8. CONCENTRADOR SOLAR

O concentrador solar possui diâmetro de 45mm e é revestido de papel alumínio. O mesmo é composto por arame de aço galvanizado moldado, figura 23. Na estrutura foi fixado um suporte de madeira para posicionamento do coletor.

Figura 23 - Concentrador solar (Estrutura/Revestido)



Fonte: Autor (2024).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE PELA TEORIA DE SCHMIDT

Mediante teste *outdoor* com o protótipo, figura 24, coletou-se os dados apresentados na tabela 2, sendo estes empregados no estudo pela teoria de Schmidt no Matlab desenvolvido por Moura (2017).

Figura 24 - Teste *Outdoor*



Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 - Dados Coletados

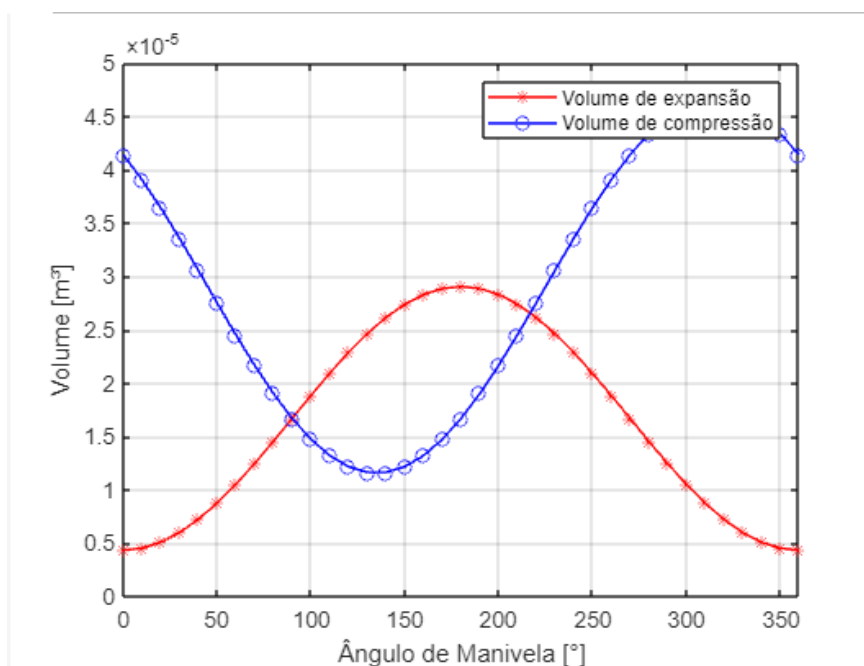
Variável	Valor	Unidade de medida
Tq	395,06	K
Tf	300,5	K
N	9,0075	HZ
R	286,9	J/kg. K
V _{SE}	2,47.10 ⁻⁵	m ³
V _{SC}	2,47.10 ⁻⁵	m ³
V _{DE}	4,34.10 ⁻⁶	m ³
V _{DC}	4,34.10 ⁻⁶	m ³

V_R	$4,34.10^{-6}$	m^3
$P_{méd}$	101300	Pa

Fonte: Autor (2024).

A análise pelo software gerou gráficos de compressão e expansão volumétricas ao longo da variação angular da manivela (figura 25), de pressão média ao longo da variação angular da manivela (figura 26), de volume total ao longo da variação angular da manivela (figura 27) e diagrama pressão volume (figura 28). O cálculo programado forneceu resultados de potências e energias indicadas de expansão, compressão e do motor, além da eficiência apresentada de acordo com os parâmetros obtidos pelo protótipo (tabela 3).

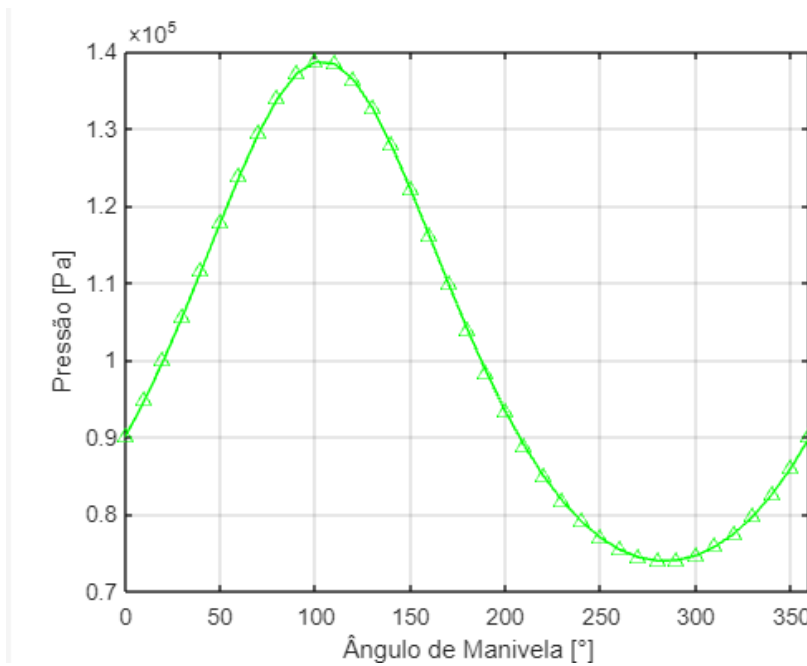
Figura 25 – Oscilações de compressão e expansão volumétricas conforme alteração angular da manivela



Fonte: Autor (2024).

A partir do gráfico acima, comprova-se a teoria do modelo matemático de Schmidt, na qual, considera que a compressão e expansão variam de acordo com uma curva senoidal.

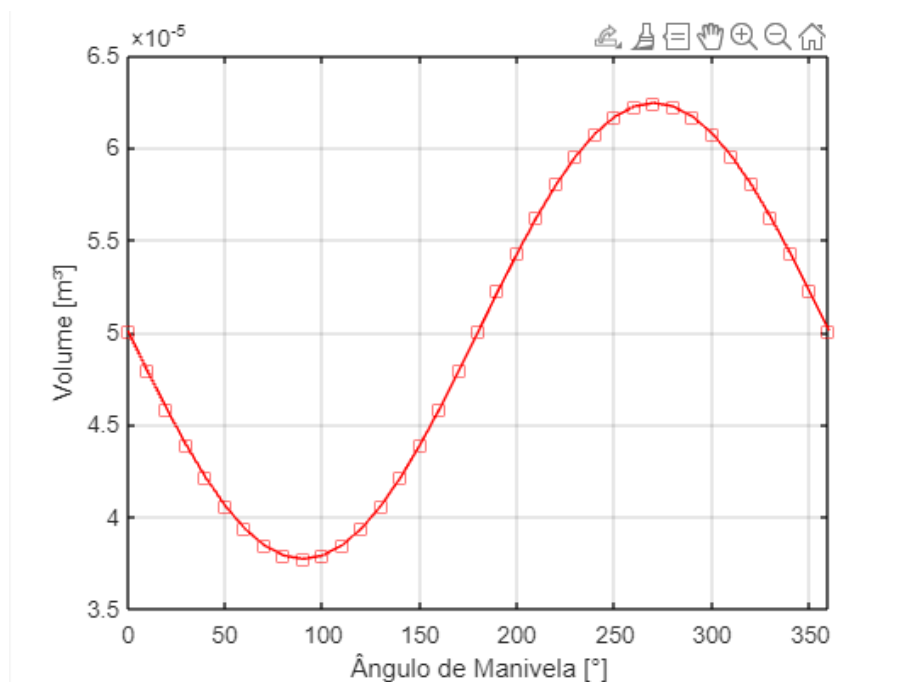
Figura 26 - Pressão média conforme alteração angular da manivela



Fonte: Autor (2024).

Na pressão é possível observar um comportamento diferente dos volumes de compressão e expansão, uma vez que, a mesma não obedece a uma curva senoidal.

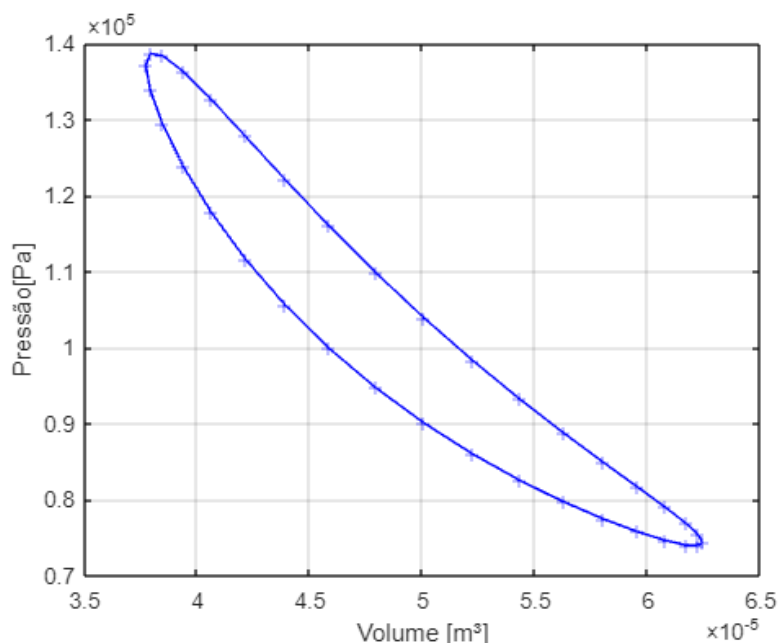
Figura 27 - Volume total conforme alteração angular da manivela



Fonte: Autor (2024).

O volume total também varia conforme curva senoidal, reafirmando os parâmetros pressupostos.

Figura 28 - Diagrama pressão-volume (P-V)



Fonte: Autor (2024).

O diagrama P-V, exemplifica o ciclo real do motor Stirling, é possível verificar o ciclo ideal na figura 3.

Tabela 3 - Dados obtidos

Variável	Valor	Unidade de medida
Ee	1,1919	J
Ec	-0,9052	J
Ei	0,2866	J
He	10,7356	W
Hc	-8,1538	W
Hi	2,5819	W
Eft	24,05	%

Fonte: Autor (2024).

O protótipo apresentou um rendimento de 24,05% mostrando um desempenho satisfatório para esse tipo de motor.

6. CONCLUSÃO

O rendimento do protótipo didático do motor Stirling Gama, apontou a viabilidade de implementação dessa tecnologia no desenvolvimento de energia sustentável, entretanto, para fins comerciais, é imprescindível a necessidade de uma produção com materiais alternativos a estes apresentados no trabalho, visando isolamento e atrito adequados.

Com o investimento na área, o motor Stirling pode inovar totalmente o meio, solucionando os problemas ambientais emergentes apresentados anteriormente. Sua empregabilidade é extremamente interessante, já que, pode ser utilizado em indústrias e até mesmo por órgãos públicos para produção em alta demanda, exemplo disso é o projeto de Maricopa, localizado no Arizona, EUA, com capacidade energética de 1,5MW, que apesar de pertencer a Tessera Solar e Stirling Energy Systems (SES), fornece a energia a Salt River Project que é de propriedade estatal. (Power Technology, 2011)

Por fim, os resultados obtidos através do Matlab, contribuíram para a comprovação da análise clássica desenvolvida por Schmidt. Uma vez que, apresentaram curvas senoidais de volume e digrama P-V próximo ao real e índice de eficiência de 24,05%, indicando que o motor é capaz de converter uma fração significativa da energia térmica em trabalho útil, mesmo em um protótipo com materiais recicláveis. Em comparação com os motores Otto e Diesel, que geralmente possuem uma eficiência entre 25% e 35% em veículos comerciais e dependem de combustíveis fósseis, o que resulta em emissões de gases poluentes, o motor Stirling se sobressai por sua flexibilidade energética, baixo impacto ambiental e operação silenciosa.

7. REFERÊNCIAS

JABARI, Farkhondeh et al. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**: A solar dish Stirling engine combined humidification-dehumidification desalination cycle for cleaner production of cool, pure water, and power in hot and humid regions. 2020. v. 37.

BHAGAT, Asawari et al. **Design of Alpha Stirling Engine in Conjunction with Solar Concentrator**: International Research Journal of Engineering and Technology, 2016. v. 3.

PLANAS, Oriol. Vantagens e desvantagens do motor Stirling. **DEMOTOR**, 2018.
Disponível em: <https://pt.demotor.net/motor-stirling/vantagens-e-desvantagens>. Acesso em: 23 ago. 2023.

MAGACHO, Isabela Tereza; SILVA, Gustavo Borges; CASTRO, Gabriel Gonçalves Pessoa. **Desenvolvimento de um motor Stirling movido a energia solar**. Curitiba: Brazilian Journal of Development, 2019.

BARROS, Robledo Wakin. **Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis**: Dissertação de Mestrado. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2005.

FINKELSTEIN, Theodor; ORGAN, Allan J. **Air Engines**: The History, Science, and Reality of the Perfect Engine. Nova York: ASME Press, 2001.

BYL, Marten. **Modeling and Simulation of Dynamic Systems**. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2002.

FOSTER, Phillip R. **Innovative Rotary Displacer Stirling Engine**: Sustainable Power Generation for Private and Fleet Vehicle Applications. Texas: The Journal of Technology Studies, 2011.

WALKER, Graham. **Stirling Engine**. Estados Unidos: Oxford University Press, 1980.

PLANAS, Oriol. Ciclo Stirling: Análise do ciclo de um motor Stirling. **DEMOTOR**, 2018. Disponível em: <https://pt.demotor.net/motor-stirling/ciclo-de-stirling>. Acesso em: 14 set. 2023.

SOUZA, João Paulo S. *et al.* **Revista Portos**: Por um mundo mais sustentável. Rio de Janeiro: Epitaya, 2019.

DAWI, Syed Mohamad H. W. *et al.* **Gamma Stirling Engine for a Small Design of Renewable Resource Model**. Selangor: Institute of Advanced Engineering and Science, 2018. v. 8.

CASTELLANOS, Luis Sebastian Mendoza. **Modelagem de Sistemas de Geração de Eletricidade a Partir De Energia Solar Utilizando Pratos Parabólicos e Motores Stirling (Dish/Stirling)**: Dissertação de Mestrado. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2012.

GHAFOUR, Sherihan Abd El-; MIKHAEL, Nady; GHANDOUR, Mohamed El-. Design and Three-Dimensional Simulation of a Solar Dish-Stirling Engine. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, 2021. Disponível em: <https://www.akademiabaru.com/submit/index.php/arfmts/article/view/1615>. Acesso em: 24 ago. 2023.

DEMEO, Ed *et al.* **Renewable Energy Technology Characterizations**. California: U.S. Department of Energy, 1997.

BLASCO, A.i. **Analisis y estudio de los sistemas de disco stirling**. Saragoça: Universidad Zaragoza, 2011.

ZABALZA, Gustavo. **Curso Fundamentos de Energia Solar Térmica**: Proyecto de Generación Energía con Disco Parabólico - Stirling. Maestría en Ingeniería de la Energía, 2010.

KECK, Thomas; SCHIEL, Wolfgang. **ENVIRODISH AND EURODISH -SYSTEM AND STATUS**. Alemanha: Schlaich Bergermann und Partner, 2002.

DENTELLO, Rodrigo Orefise. **ESTUDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MOTORES STIRLING ACIONADOS POR BIOGÁS E/OU ENERGIA SOLAR**:

Dissertação de Mestrado. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 2019.

ROGDAKIS, E. D. **A MathCAD program (AMOCO) as a simple tool for the study of the Stirling engines**. Alemanha: EUROPEAN STIRLING FORUM, 2002.

HIRATA, Koichi. SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES. **Stirling Engine**, 1997. Disponível em: <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>. Acesso em: 29 ago. 2023.

The Maricopa Solar Plant Project, USA: The Maricopa Solar Plant is a 1.5MW concentrating solar power project in Peoria, in the state of Arizona, US. The projec. **Power Technology**, 2011. Disponível em: <https://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/?cf-view&cf-closed>. Acesso em: 18 out. 2023.

MOURA, Cassiano Metier. **ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM MÓDULO COMPACTO BASEADO NO CICLO STIRLING PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DOS GASES DE ESCAPE DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA**: Trabalho de conclusão de curso. UBERLÂNDIA: FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2017.

8. ANEXOS

%Simulação do desempenho de um motor Stirling gama por meio da análise de Schmidt

clear;

close ;

clc;

%Variáveis de entrada

pmed = 101300; %Pressão média do motor Pa

R = 286.9; %Constante do ar j/kg.K

Te = 395.06; %Temperatura de expansão K

Tc = 300.05; %Temperatura de compressão K

Dx = 90; %Ângulo de fase °

n = 540.45/60; %Rotação do motor Hz

alfa = 0; %Ângulo de giro °

Vse = 2.47E-5; %Volume percorrido pelo pistão de expansão m³

Vsc = 2.47E-5; %Volume percorrido pelo pistão de compressão m³

Vde = 4.34E-6; %Volume morto do espaço de expansão m³

Vdc = 4.34E-6; %Volume morto do espaço de compressão m³

Vr = 4.34E-6 ; %Volume do regenerador m³ (0 significa sem regenerador)

%Vetor que varia o ângulo do eixo do motor

x = 0:10:360; % x = 0 quando o pistão de expansão está localizado no

% ponto morto superior

%Cálculos para simular o funcionamento do motor Stirling

Ve = (Vse/2).*(1-cosd(x)) + Vde; %Volume instantâneo de expansão m³

Vc = (Vse/2).*(1+cosd(x))+(Vsc/2).*(1-cosd(x-Dx)) + Vdc; %Volume instantâneo de compressão %m³

V = Ve + Vr + Vc; %Volume total instantâneo m³

Tr = (Te + Tc)/2; %Temperatura do regenerador K

t = Tc/Te; %Temperatura relativa

v = Vsc/Vse; %Volume percorrido relativo

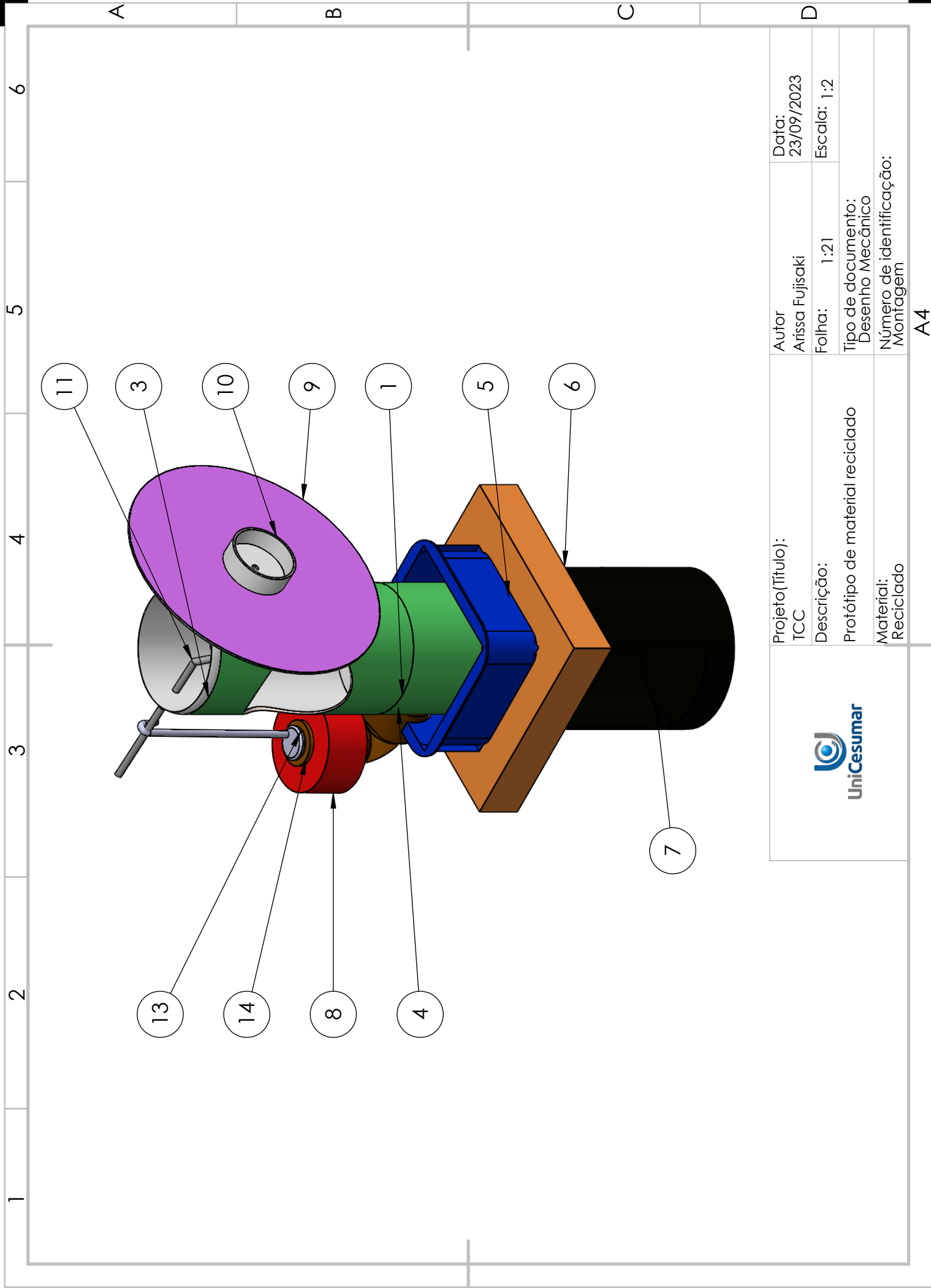
Xde = Vde/Vse; %Volume morto de expansão relativo

```

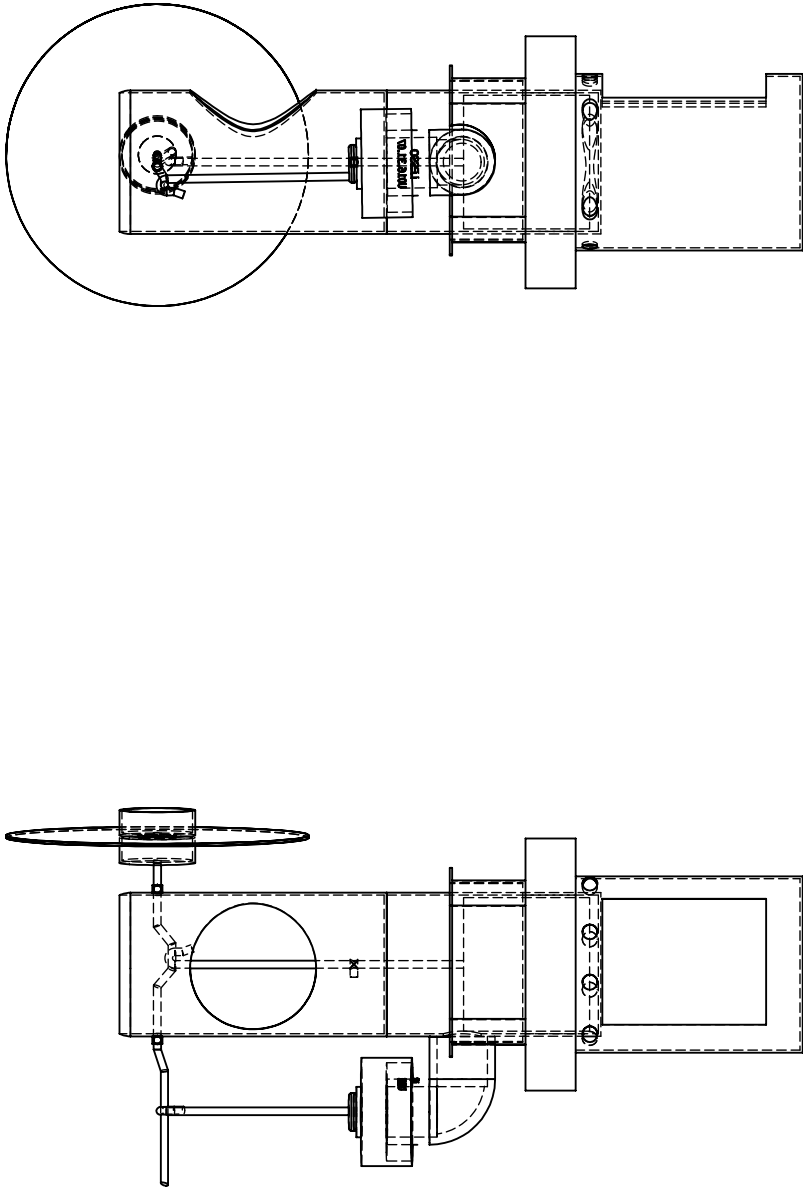
Xdc = Vdc/Vse; %Volume morto de compressão relativo
Xr = Vr/Vse; %Volume do regenerador relativo
%Variáveis=====
a = -atand((v*sind(Dx))/(t*cosd(Dx)-1));
S = t + 2*t*Xde + (4*t*Vr)/(1+t) + v + 2*Xdc+1;
B = sqrt((t^2) + 2*(t-1)*v*cosd(Dx) + (v^2)-2*t+1);
c = B/S;
%=====
p = pmed*sqrt(1-c^2) ./ (1+c*cosd(x+a)); %Pressão do motor Pa
Ee = (pmed*Vse*pi*c*sind(a))/(1+sqrt(1-c^2)); %Energia indicada para aexpansãoJ
Ec = -(pmed*Vse*pi*c*t*sind(a))/(1+sqrt(1-c^2)); %EnergiaindicadaparaacompressãoJ
Ei = (pmed*Vse*pi*c*(1-t)*sind(a))/(1+sqrt(1-c^2)); %EnergiaindicadadeumciclodomotorJ
He = Ee*n; %Potência indicada de expansão W
Hc = Ec*n; %Potência indicada de compressão W
Hi = Ei*n; %Potência indicada do motor w
Eft = Ei/Ee; %Eficiência térmica do motor
figure
plot(x,Ve,'r*-',x,Vc,'bo-');
ylabel('Volume [m³]');
xlabel('Ângulo de Manivela [°]');
legend('Volume de expansão','Volume de compressão');
xlim([0 360]);
grid on
figure
plot(x,p,'g^-');
ylabel('Pressão [Pa]');
xlabel('Ângulo de Manivela [°]');
xlim([0 360]);
grid on
figure
plot(x,V,'rs-');

```

```
ylabel('Volume [m³]');  
xlabel('Ângulo de Manivela [°]');  
xlim([0 360]);  
grid on  
figure  
plot(V,p,'b+-');  
ylabel('Pressão[Pa]');  
xlabel('Volume [m³]');  
grid on
```



	Projeto (Título): TCC	Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição:	Folha: 1:21	Escala: 1:2
	Protótipo de material reciclado	Tipo de documento: Desenho Mecânico	
	Material: Reciclado	Número de identificação: Montagem	
	A4		



Projeto(Título):
TCC

Autor
Arissa Fujisaki

Data:
23/09/2023

Descrição:

Folha: 3:21

Escala: 1:3

Protótipo de material reciclado

Tipo de documento:
Desenho Mecânico

Material:
Material Reciclado

Número de identificação:
Montagem

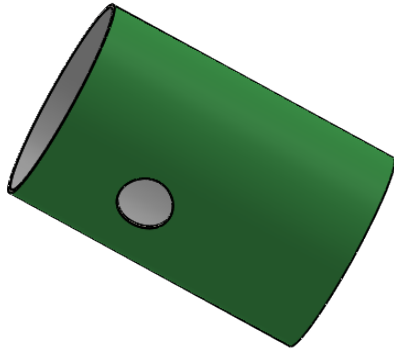
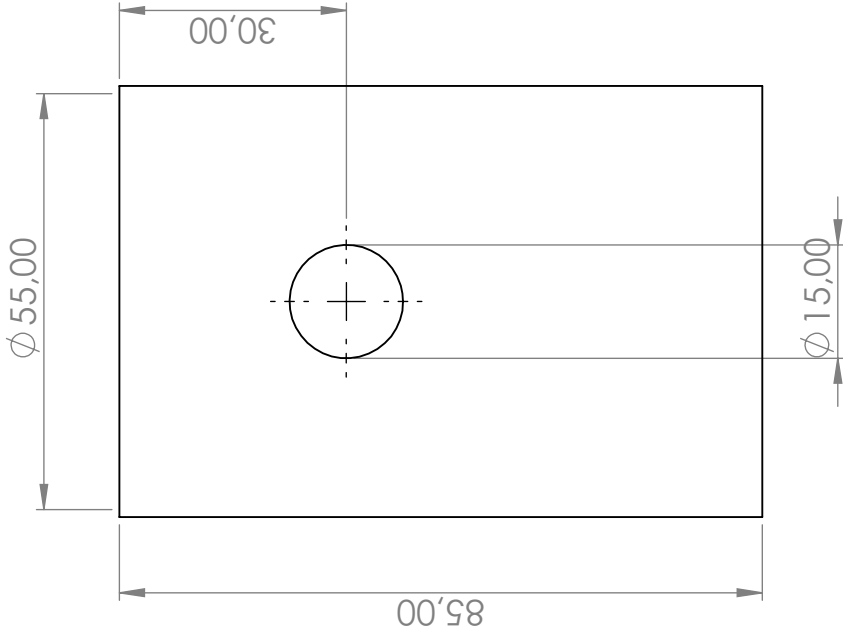
123456

A

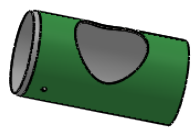
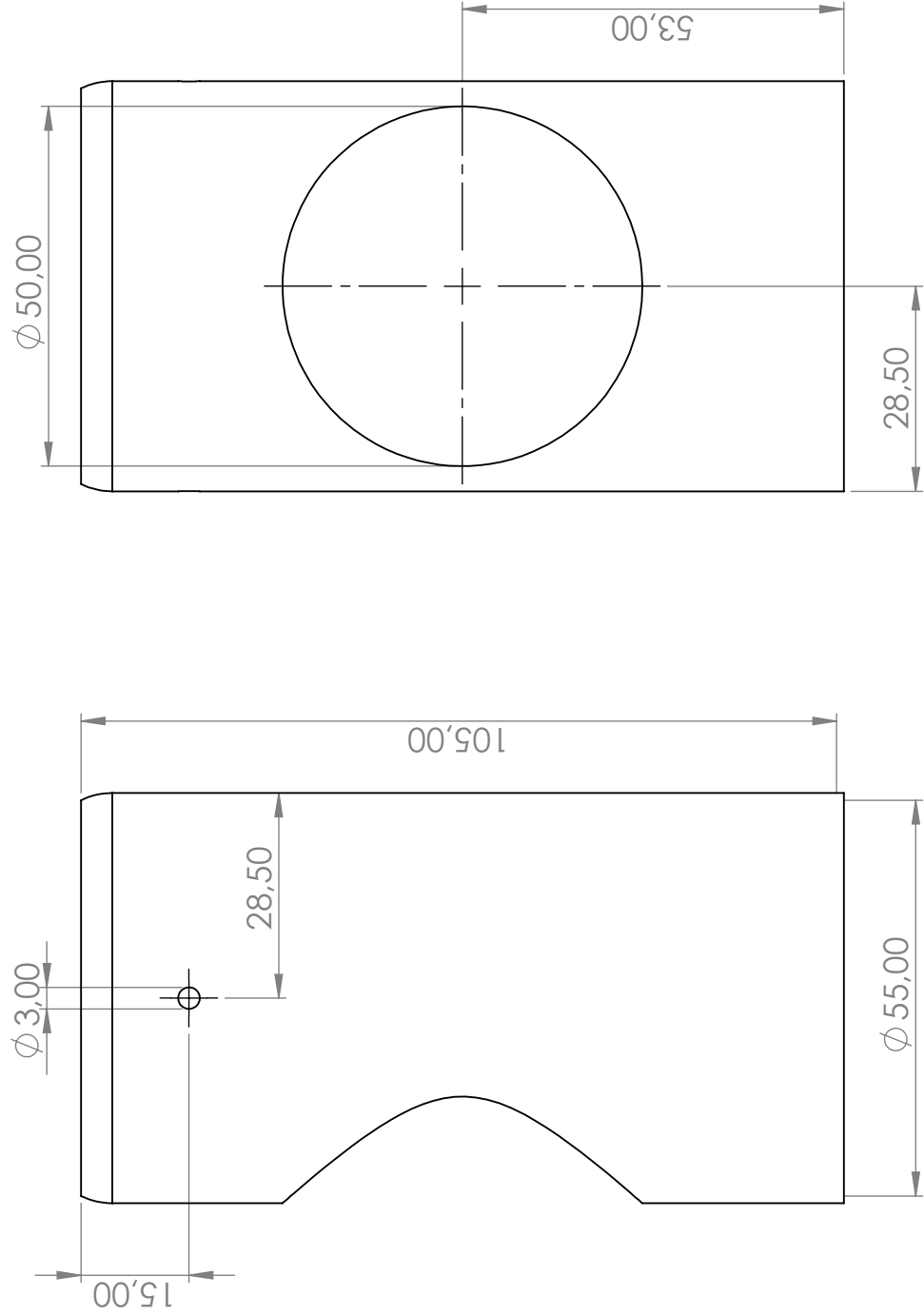
B

C

D



	Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: Lata de refrigerante reciclada		Folha: 4:21	Escala: 1:1
	Material: Alumínio		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
			Número de identificação: Zona de troca de calor	



	Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: Lata de refrigerante reciclada		Folha: 5:21	Escala: 1:1
	Material: Alumínio		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
			Número de identificação: Zona de ajuste ao virábrequim	

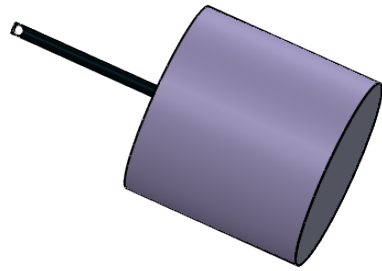
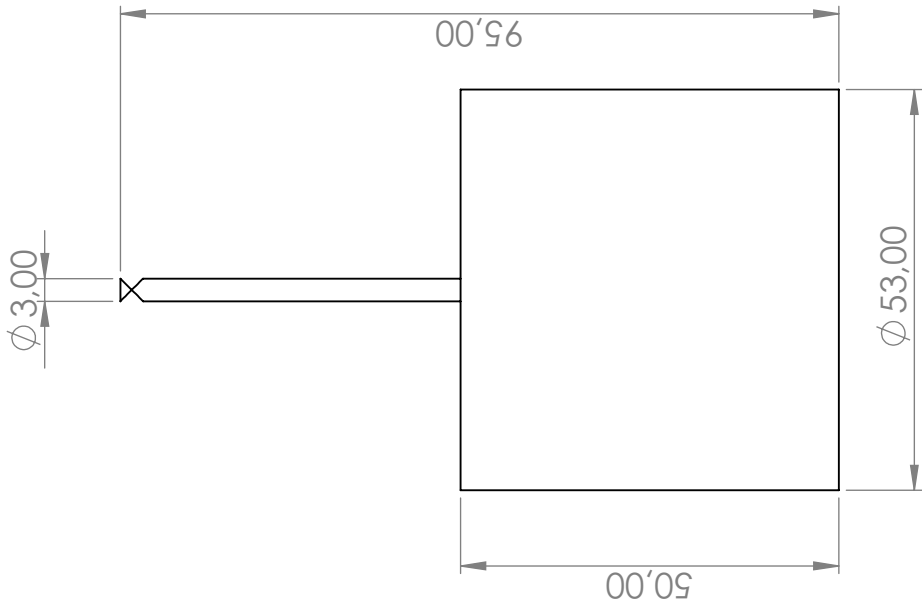
1 2 3 4 5 6

A

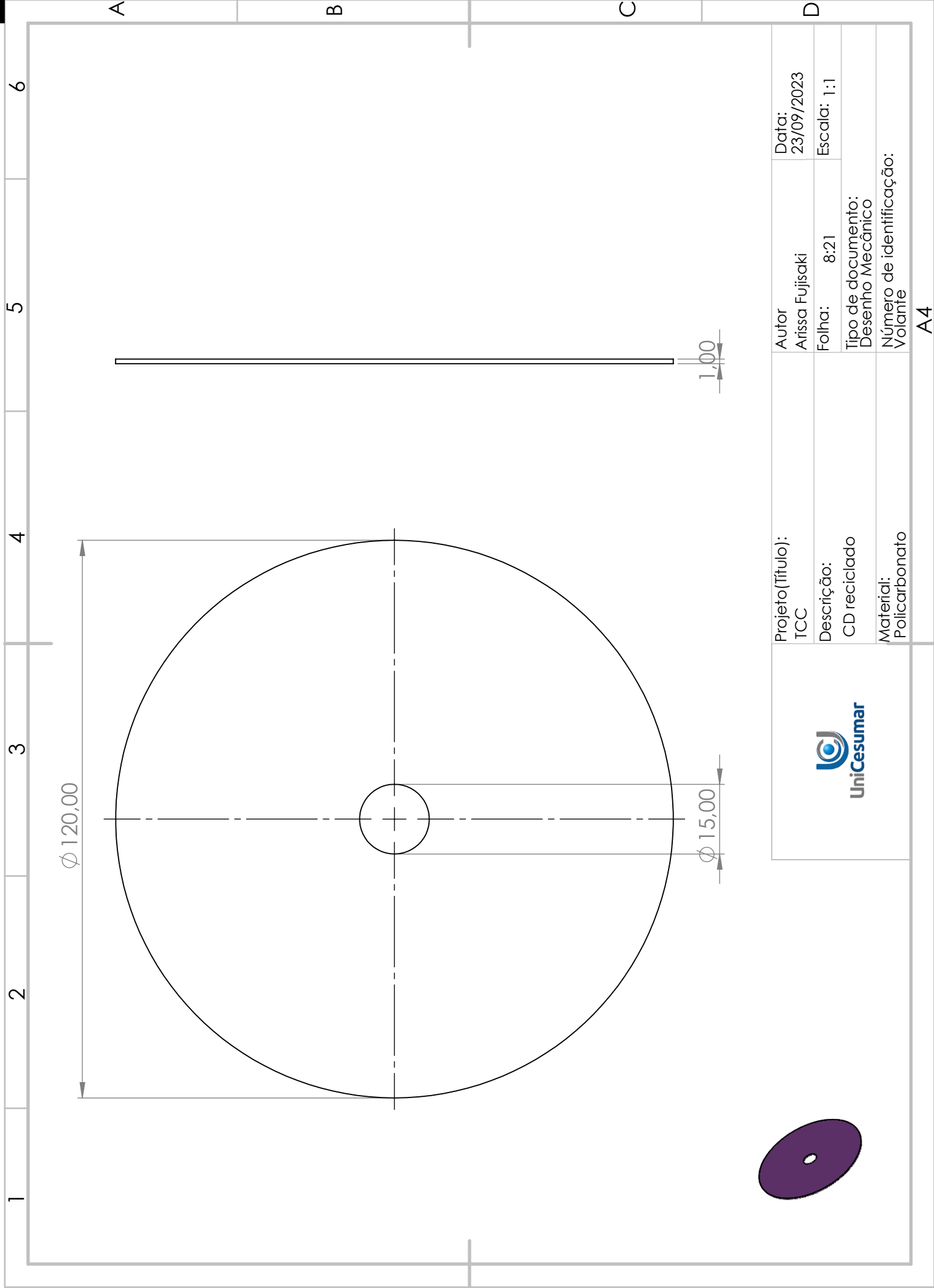
B

C

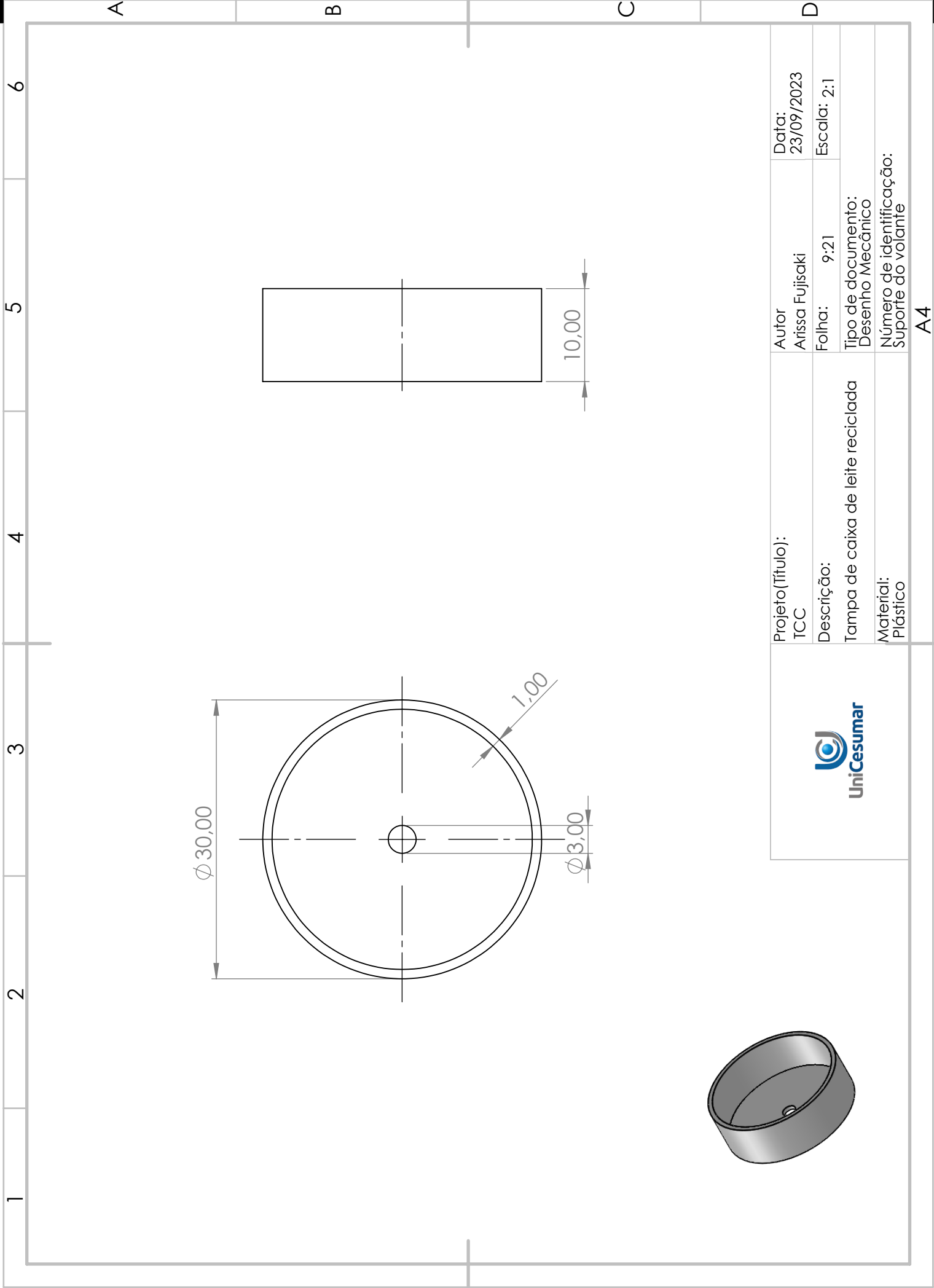
D



	Projeto(Título): TCC	Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição:	Folha: 6:21	Escala: 1:1
	Pistão de lã de aço e arame	Tipo de documento: Desenho Mecânico	
	Material: Aço e metal	Número de identificação: Pistão de deslocamento	



	Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: CD reciclado		Folha: 8:21	Escala: 1:1
	Material: Policarbonato		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
			Número de identificação: Volante	



	Projeto(Título): TCC	Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição:	Folha: 9:21	Escala: 2:1
	Tampa de caixa de leite reciclada		
	Material: Plástico	Tipo de documento: Desenho Mecânico	
		Número de identificação: Suporte do volante	

123456

A

B

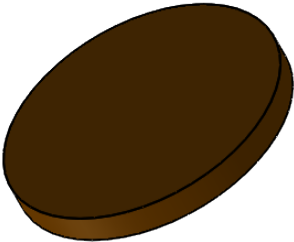
C

D

Ø 20,00



2,00



Projeto(Título):
TCC

Autor
Arissa Fujisaki

Data:
23/09/2023

Descrição:
Moeda

Folha: 10:21

Escala: 5:1

Material:
Aço Inoxidável

Tipo de documento:
Desenho Mecânico

Número de identificação:
Moeda

A4

123456

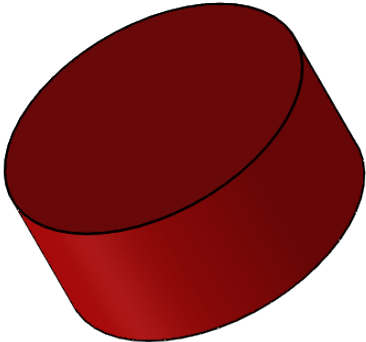
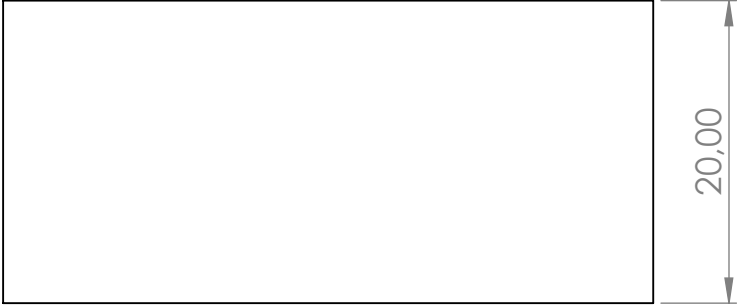
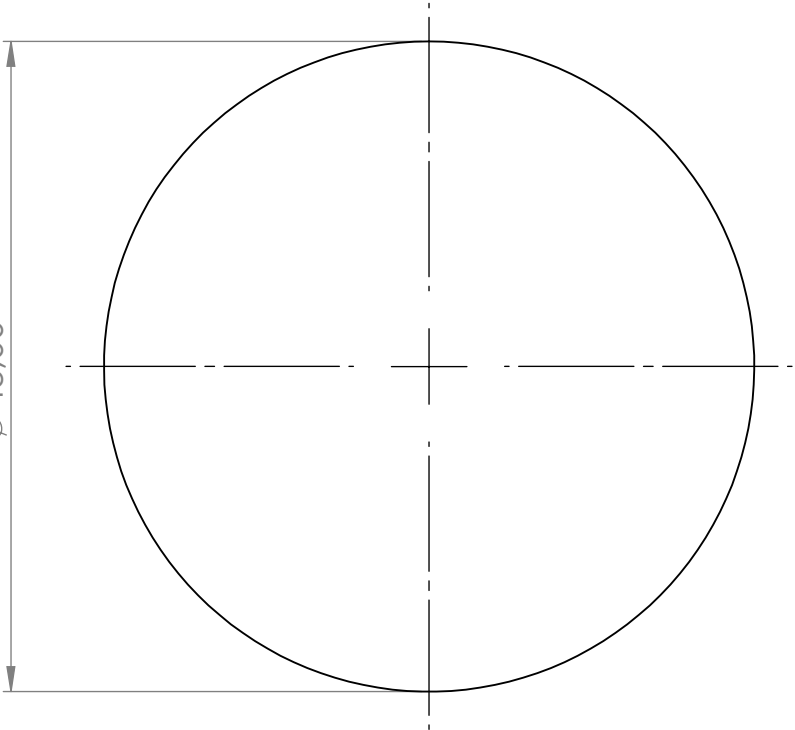
A

B

C

D

Ø 43,00



Projeto(Título):

TCC

Autor

Arissa Fujisaki

Data:

23/09/2023

Descrição:

Lata de desodorante reciclada

Folha:

11:21

Escala:

2:1

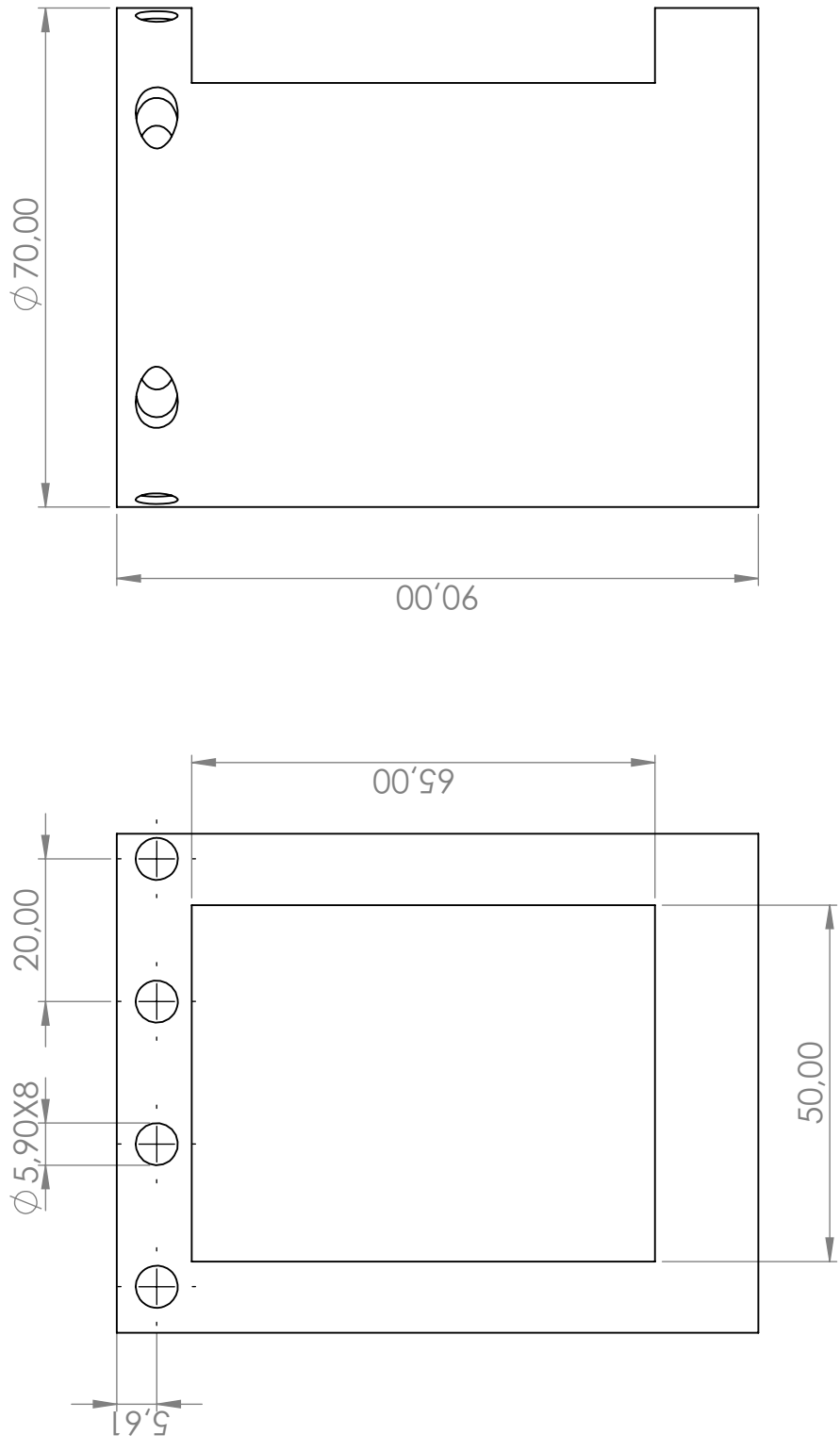
Tipo de documento:

Desenho Mecânico

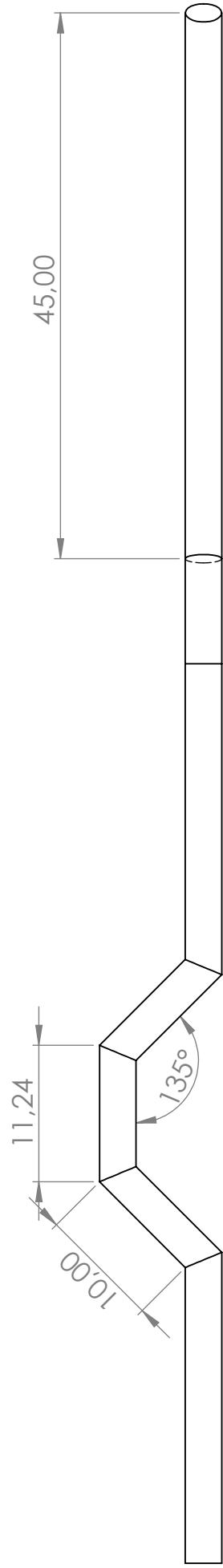
Número de identificação:

Zona de expansão e compressão

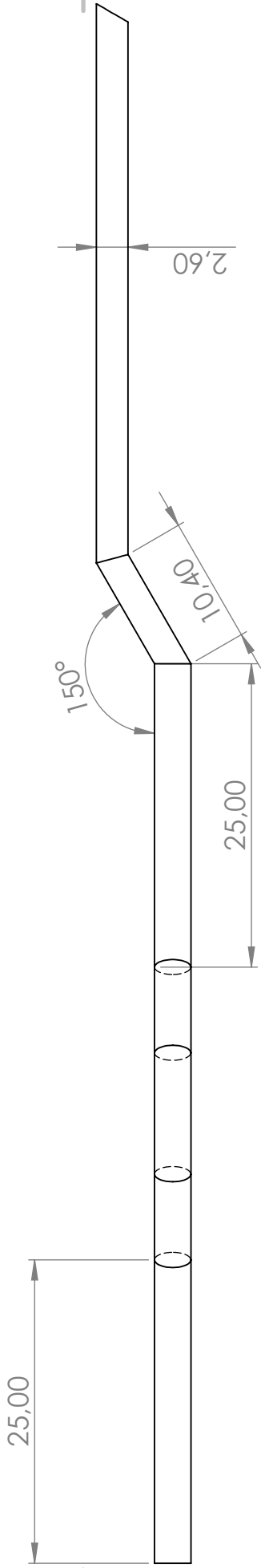
A4



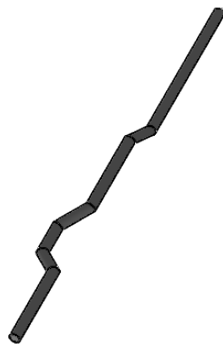
Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
Descrição: Lata de extrato de tomate reciclada		Folha: 12:21	Escala: 1:1
Material: Alumínio		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
		Número de identificação: Zona quente	



B



C



D

	Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: Arame		Folha: 13:21	Escala: 2:1
	Material: Aço galvanizado		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
			Número de identificação: Virabrequim	

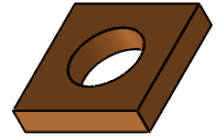
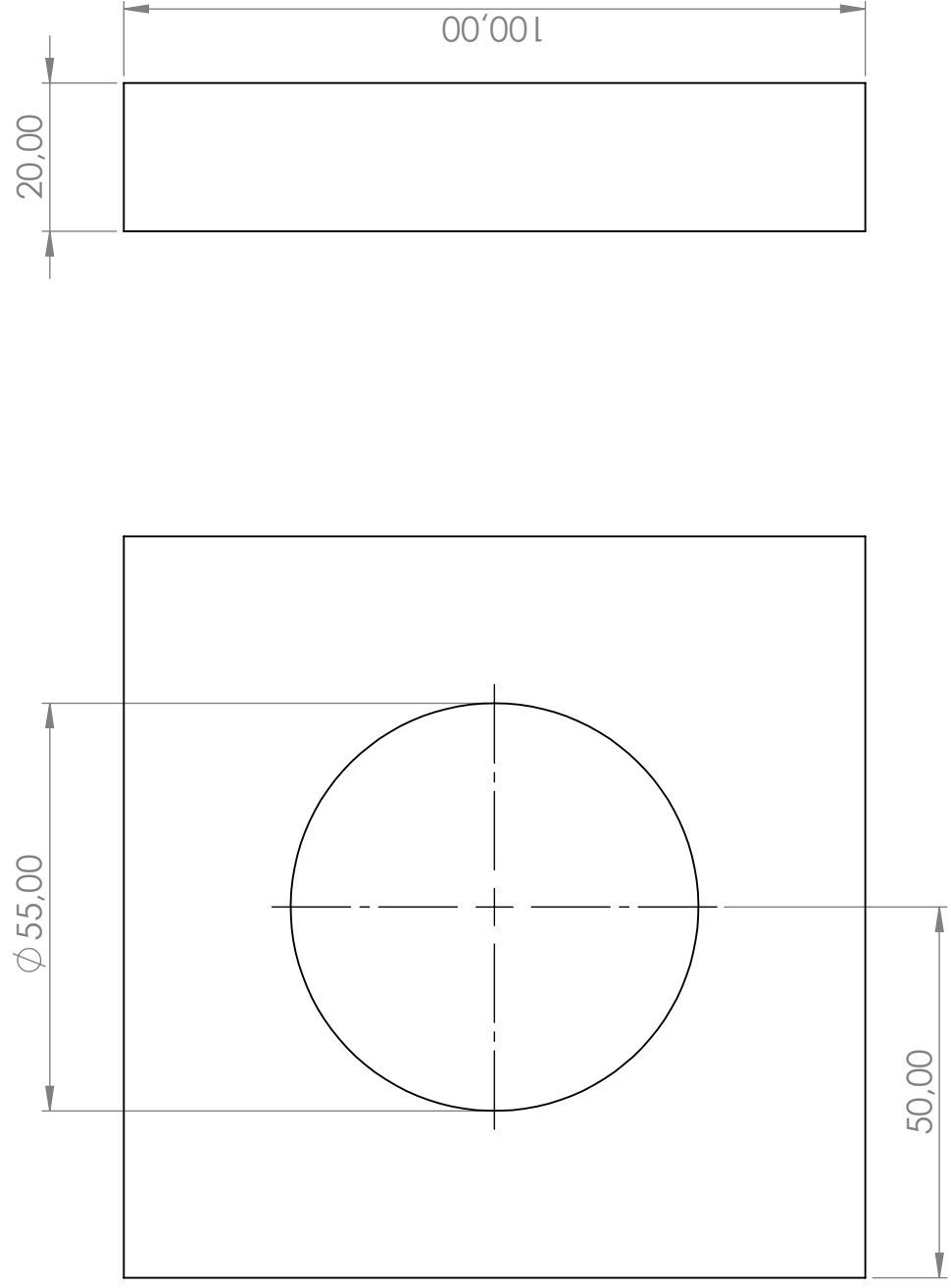
123456

A

B

C

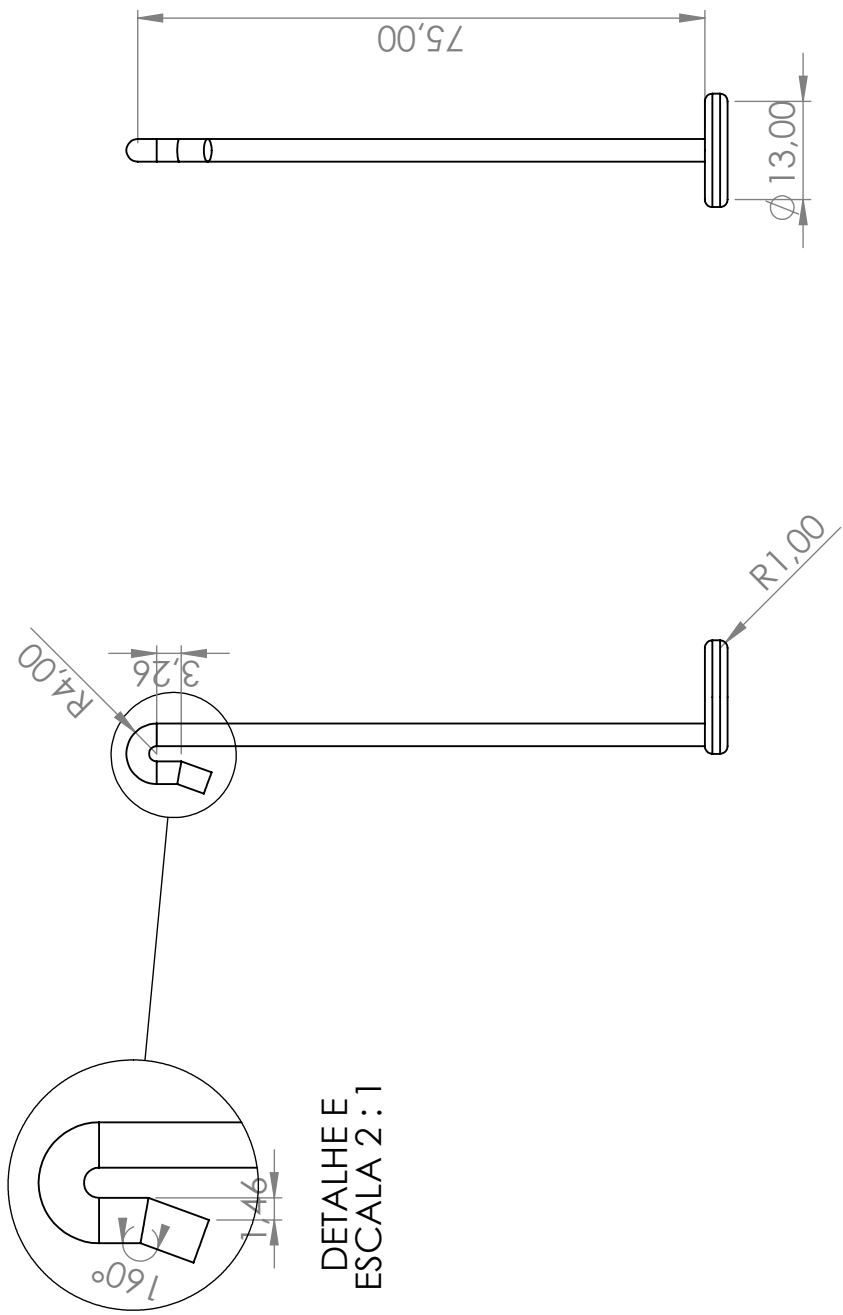
D



	Projeto(Título): TCC	Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição:	Folha: 14:21	Escala: 1:1
	Madeira reciclada	Tipo de documento: Desenho Mecânico	
	Material: Madeira	Número de identificação: Madeira para isolamento térmico	

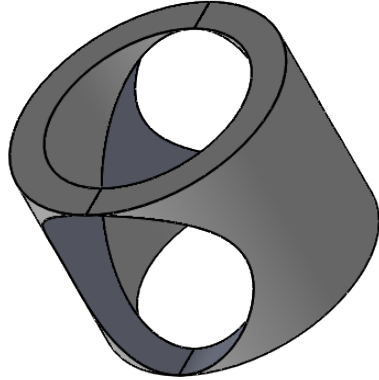
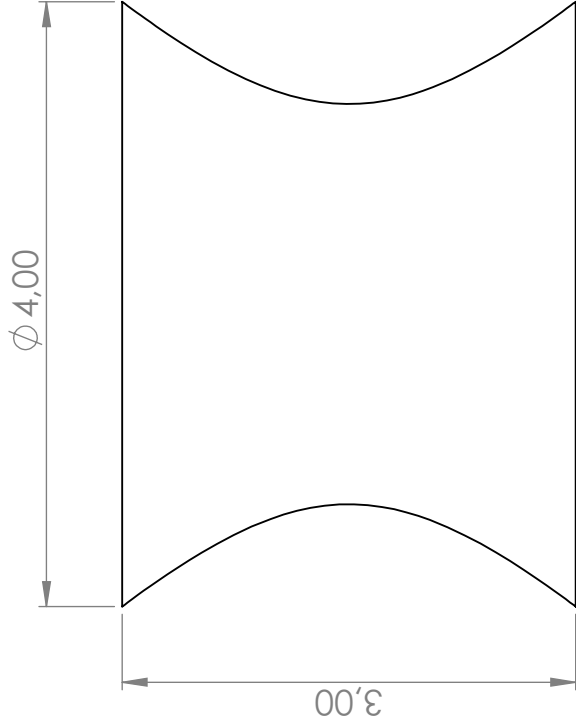
123456

A B C D



Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
Descrição: Arame		Folha: 15:21	Escala: 1:1
Material: Aço galvanizado		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
		Número de identificação: Bielá B	





Projeto(Título):

TCC

Autor

Arissa Fujisaki

Data:

23/09/2023

Descrição:

Palito de pirulito reciclado

Folha:

16:21

Escala:

20:1

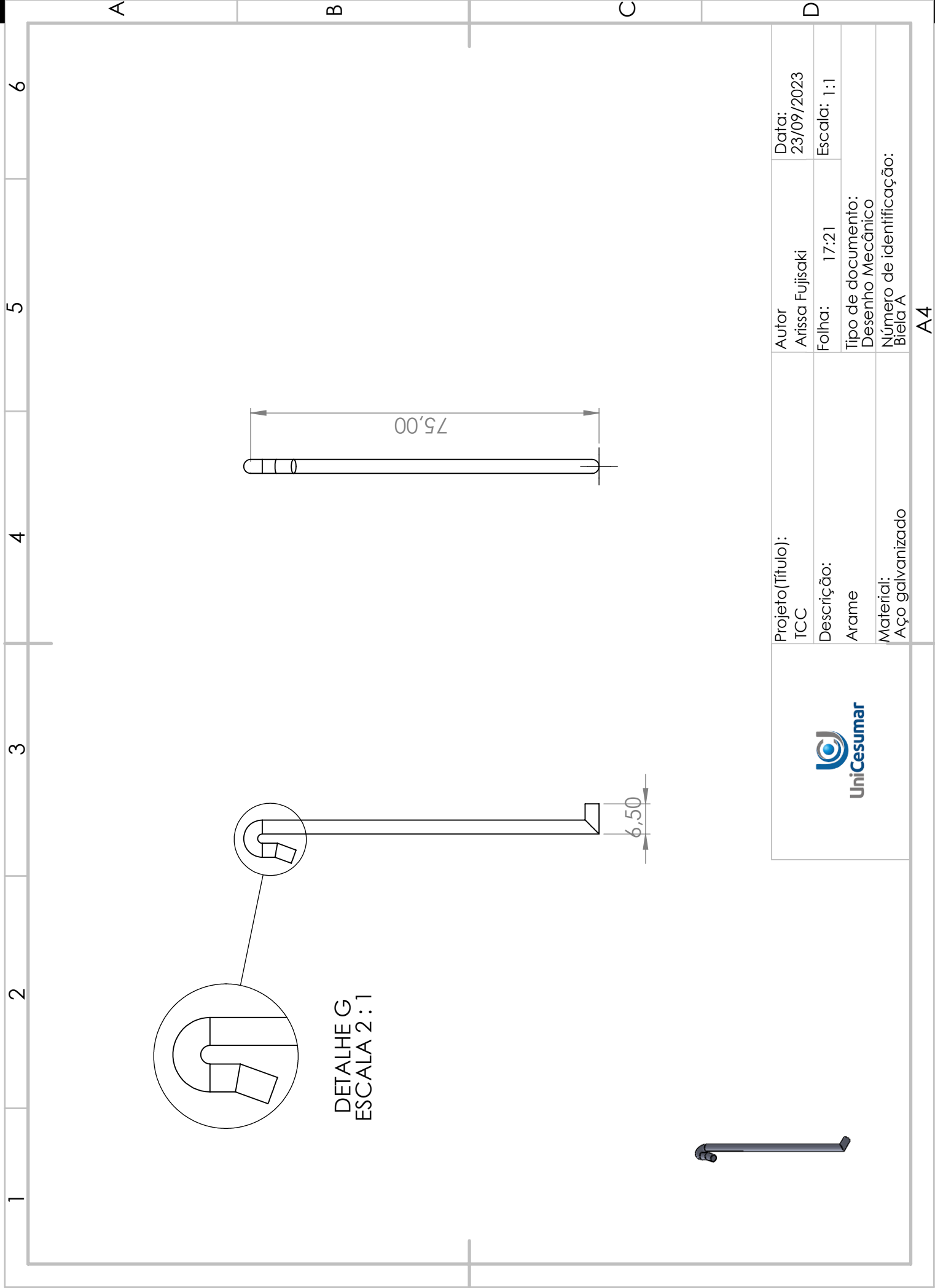
Tipo de documento:

Desenho Mecânico

Número de identificação:

Conectores





Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
Descrição: Arame		Folha: 17:21	Escala: 1:1
Material: Aço galvanizado		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
		Número de identificação: Biel A	

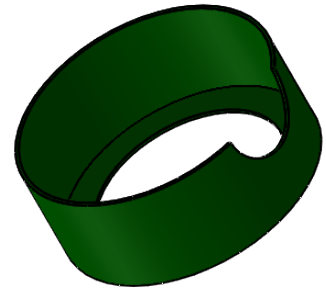
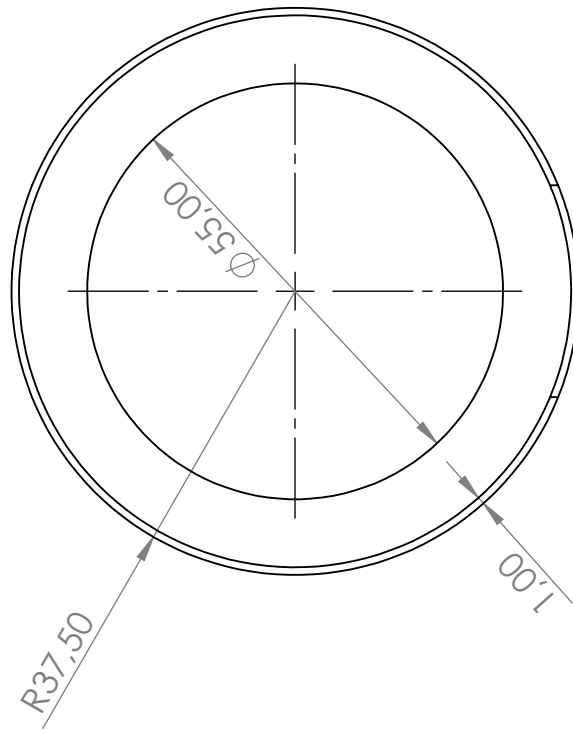
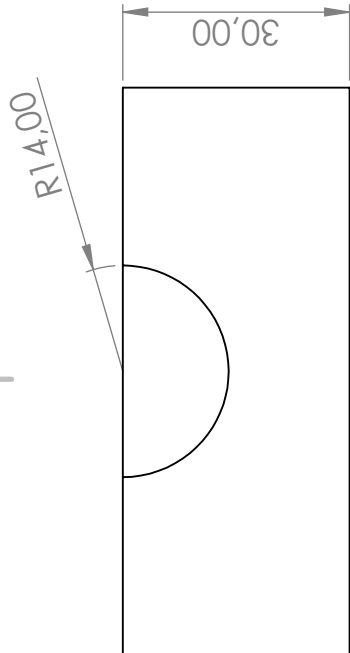
123456

A

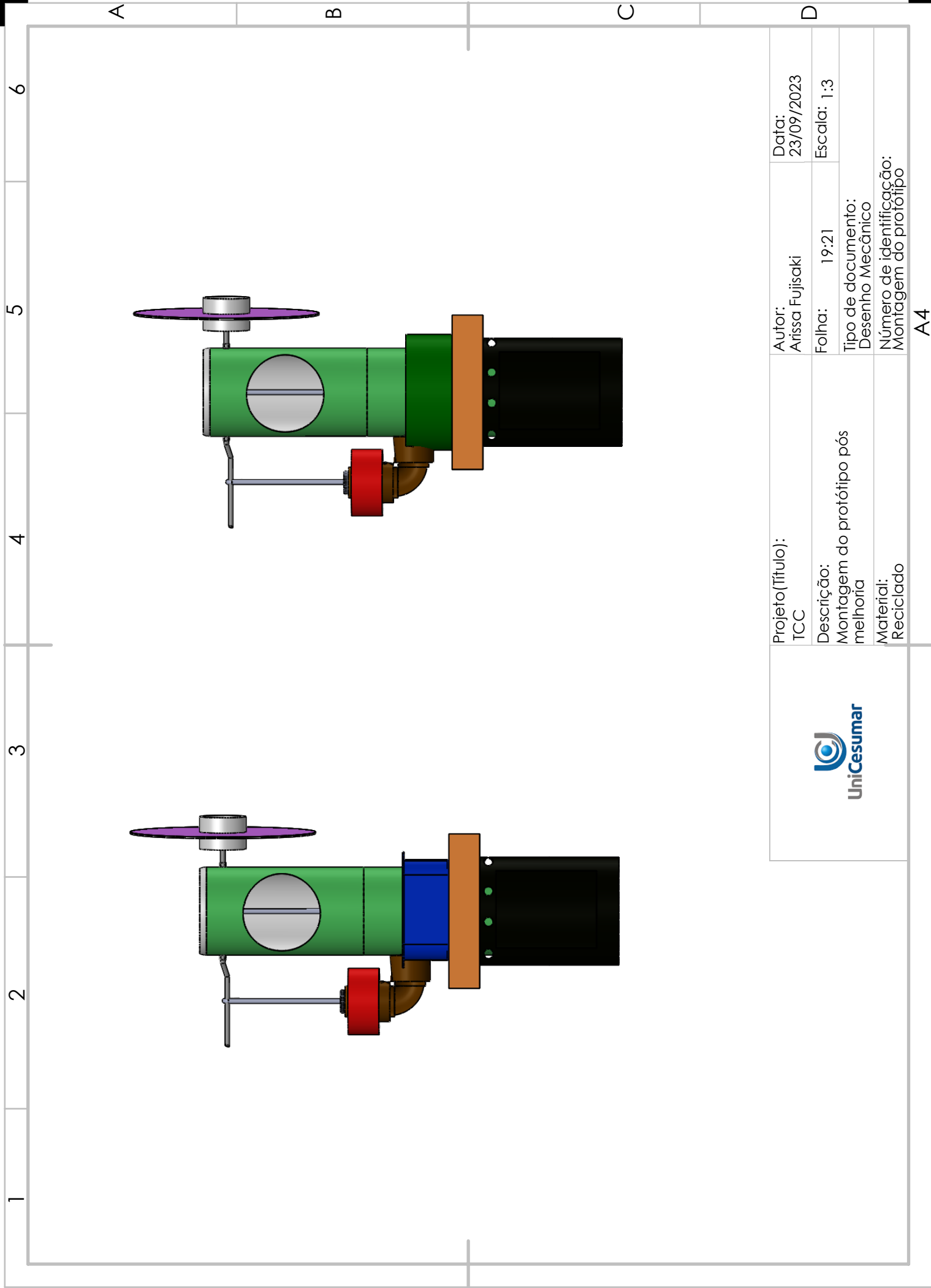
B

C

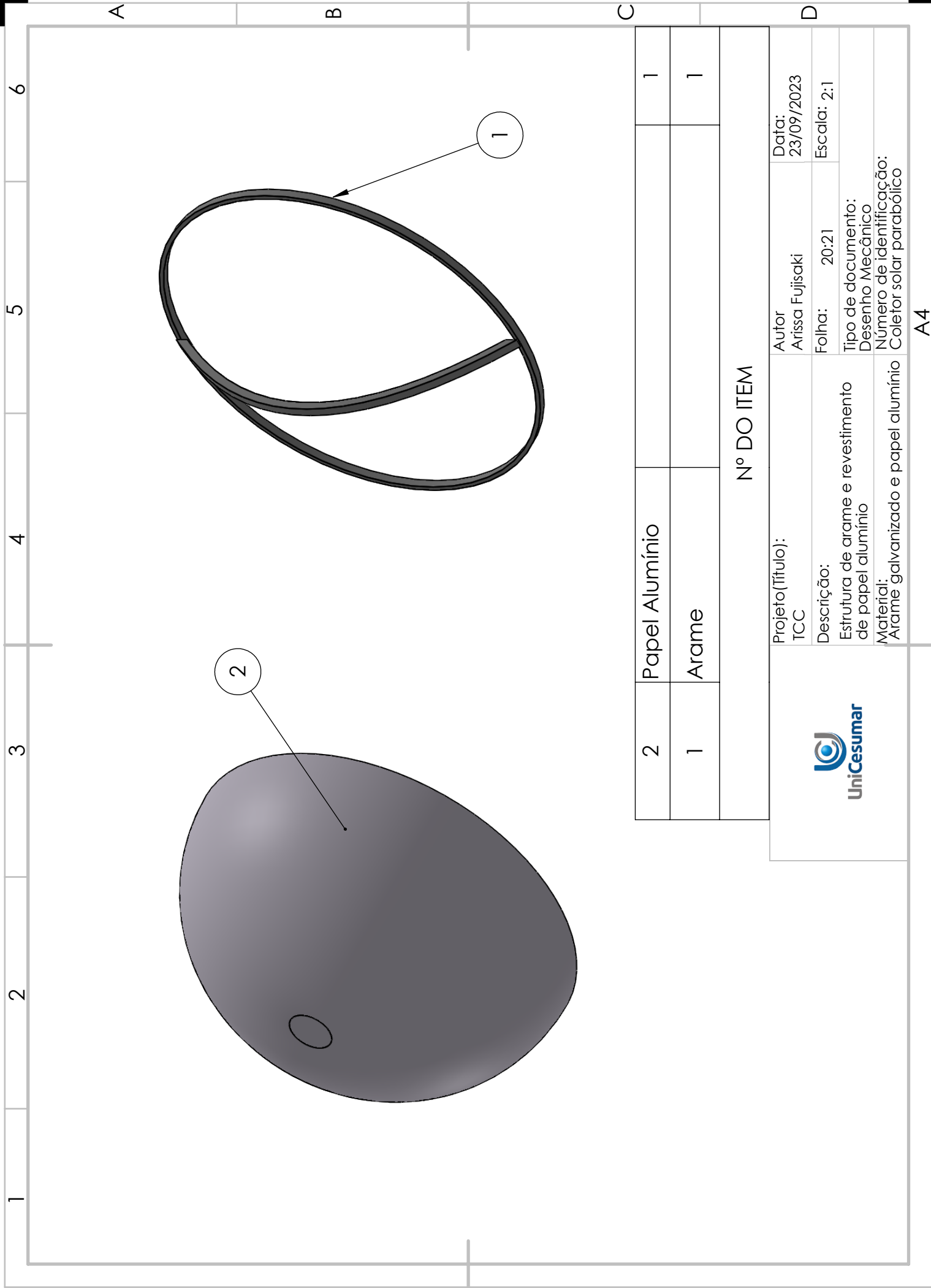
D



 Unicesumar	Projeto(Título): TCC		Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: Lata de milho reciclada		Folha: 18:21	Escala: 1:1
	Material: Alumínio		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
			Número de identificação: Zona fria 2	



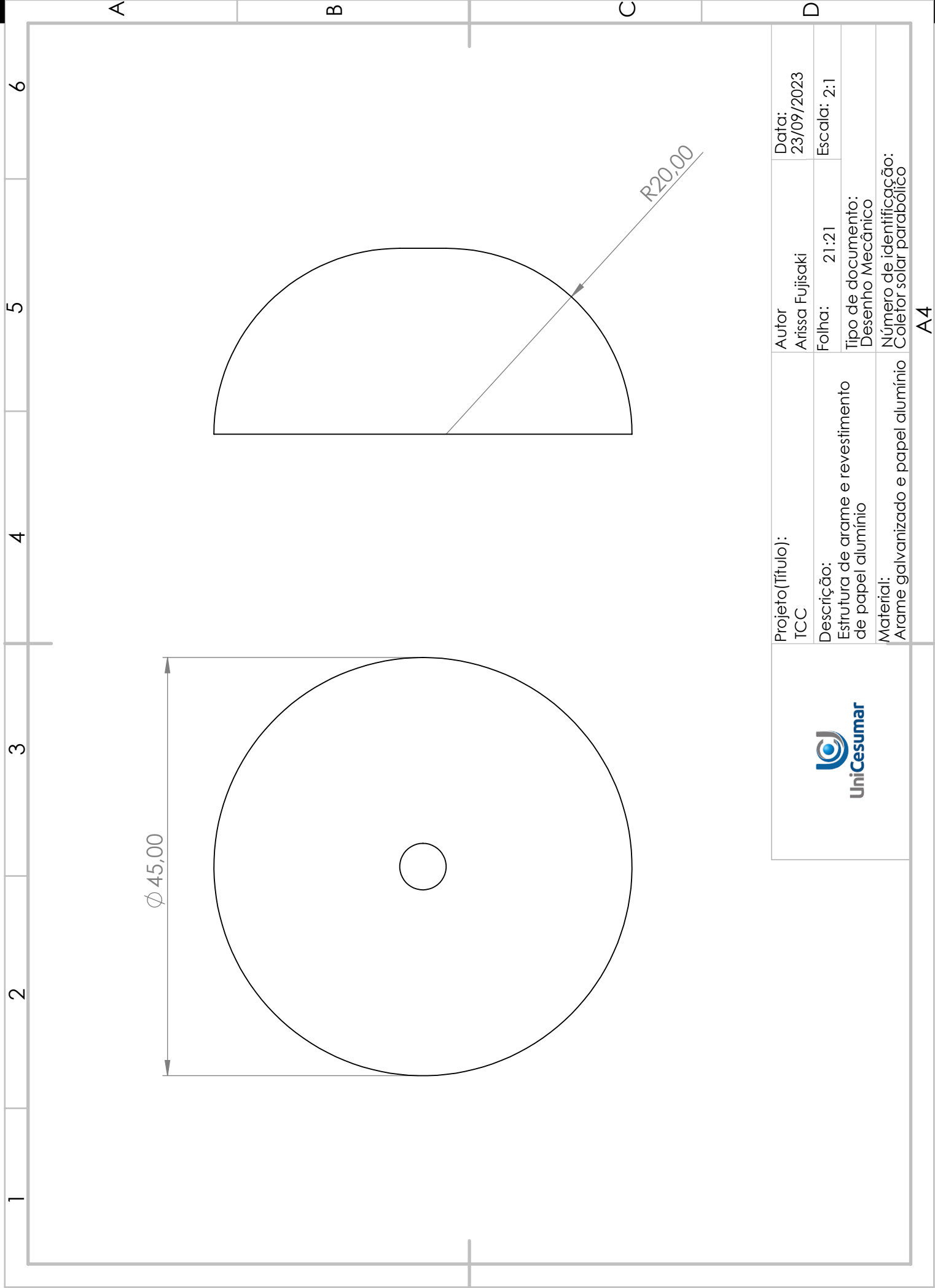
	Projeto(Título): TCC	Autor: Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: Montagem do protótipo pós melhoria	Folha: 19:21	Escala: 1:3
		Tipo de documento: Desenho Mecânico	
	Material: Reciclado	Número de identificação: Montagem do protótipo	



2	Papel Alumínio	1
1	Arame	1

Nº DO ITEM

 UniCesumar	Projeto(Título): TCC	Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: Estrutura de arame e revestimento de papel alumínio	Folha: 20:21	Escala: 2:1
	Tipo de documento: Desenho Mecânico		
	Número de identificação: Coletor solar parabólico		



	Projeto(Título): TCC	Autor Arissa Fujisaki	Data: 23/09/2023
	Descrição: Estrutura de arame e revestimento de papel alumínio	Folha: 21:21	Escala: 2:1
	Material: Arame galvanizado e papel alumínio	Número de identificação: Coletor solar parabólico	