

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AYAN MARTINS PEREIRA

**FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM MOTOR STIRLING TIPO
GAMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

AYAN MARTINS PEREIRA

**FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM MOTOR STIRLING TIPO
GAMA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Hioki
Co-orientador: Prof. Dr. José Antônio A. Velásquez A.

CURITIBA

2015

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM MOTOR STIRLING TIPO GAMA”, realizada pelo aluno AYAN MARTINS PEREIRA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Hioki
UTFPR - Damec

Curitiba, 19 de Novembro de 2015.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM MOTOR STIRLING TIPO GAMA”, realizada pelo aluno AYAN MARTINS PEREIRA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Daniel Hioki
DAMEC – UTFPR
Orientador

Prof. Dr. José Antônio Andrés Velásquez Alegre
DAMEC – UTFPR
Co-orientador

Prof. Dr. Luciano Fernando dos Santos Rossi
DAMEC – UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Celso Salamon
DAMEC – UTFPR
Avaliador

Curitiba, 14 de Dezembro de 2015.

RESUMO

As fontes de energia são cada vez mais escassas e, por isso, procura-se por métodos alternativos para geração de energia elétrica. Tendo em vista a crescente demanda por novas fontes de geração de energia e o esgotamento das riquezas energéticas fósseis, os motores Stirling se mostram como uma alternativa para este possível problema mundial, pois podem utilizar fontes de energia já existentes, como a energia solar ou a geotérmica. Neste contexto é pouco poluente, não emite gases de exaustão e porquanto aproveita a energia renovável como forma de combustível. O objetivo deste trabalho é a fabricação e o estudo do funcionamento de um motor Stirling tipo gama. É realizado um estudo do ciclo Stirling segundo teorema de Schmidt para se obter as dimensões dos componentes e a potência de saída. Por último é realizada a fabricação e testes de funcionamento juntamente com a coleta de dados experimentais, tais como, temperaturas, velocidade, potência em função da temperatura e o ângulo de fase. Apesar das limitações do teorema de Schmidt, pois considera o gás sendo ideal e por considerar a compressão e a expansão como processos isotérmicos, a análise de Schmidt mostrou-se adequada para o dimensionamento e o funcionamento do motor. O projeto mecânico fabricado utilizando técnicas de produção, juntamente com o estudo de funcionamento, reforçará na compreensão e facilitará novos estudos dos motores Stirling.

Palavras-chave: Motor Stirling, Energia elétrica, Componentes comerciais, teorema de Schmidt, Regenerador.

ABSTRACT

The Energy supplies are increasingly scarce and, therefore, looking for alternative methods for electricity generating. there view of the growing demand for new sources of energy generation and depletion of fossil energy resources. Stirling engines are an alternative to this possible problem worldwide because they can use existing energy sources such as solar or geothermal energy. In this context is low-polluting, emits no exhaust gases and because harnesses renewable energy as a way to fuel. The objective of this work is the manufacture and the engine running study for a Stirling type gamma. A study of the Stirling cycle is performed according to Schmidt's theorem to obtain the dimensions of the components and the output power. Lastly is performed to manufacture and test the operation with the collection of experimental data such as temperature, speed, power depending on the temperature and phase angle. Despite the limitations of the theorem, considering the gas as ideal, the Schmidt analysis was adequate for the design and operation of the mechanical design. The mechanical design using manufacturing techniques, together with the operation study enhance understanding and facilitate further studies of Stirling engines.

Keywords: Stirling engine, electric power, commercial components, Schmidt theorem, Regenerator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estrutura da oferta interna de eletricidade no mundo em 2012 (figura a) e no Brasil em 2013 (figura b).	16
Figura 2 – O Ciclo Stirling e seus elementos realizando um ciclo completo.	19
Figura 3 - Arranjos mecânicos de (a) simples ação e (b) dupla ação.	21
Figura 4 - A figura mostra os três tipos de motores Stirling: tipo alfa, tipo beta e tipo gama, respectivamente.	22
Figura 5 - Componentes que constitui um motor Stirling tipo gama	23
Figura 6. Influência das perdas sobre a potência de um motor sem volume morto.	26
Figura 7 - Motor Stirling tipo alfa fabricado sem sucesso de funcionamento.	27
Figura 8 - Metodologia do projeto de fabricação do motor Stirling	29
Figura 9 - Motor stirling tipo gama testado pela primeira vez.	31
Figura 10 – Montagem do cilindro deslocador e a haste de aço, ambos utilizados para fabricação do motor Stirling tipo gama	31
Figura 11 - Processo de usinagem da montagem da câmara de resfriamento com vedação de bronze grafitado.	32
Figura 12 - Processo de usinagem da câmara de resfriamento	32
Figura 13 - Arranjo elétrico para medição da Potência fornecida pelo motor.	35
Figura 14 - Bancada de experimentos do Motor Stirling	37
Figura 15 - Pistão de potência feito inicialmente utilizando ferro fundido e posteriormente utilizando alumínio com vedação de anel O'ring de tamanho número 13.	38
Figura 16 - Processo de fabricação das câmaras	39
Figura 17 - Processo de furação e posteriormente torneamento da base do motor	40
Figura 18 - Processo de torneamento da árvore de transmissão de potência	40
Figura 19 - Conjunto de peças e submontagens utilizadas para funcionamento do motor Stirling tipo gama	41

Figura 20 - Sistema de transmissão de movimento (virabrequim) utilizado no projeto	42
Figura 21 - Funcionamento do motor ao longo do tempo	43
Figura 22 - Influência da temperatura do cilindro quente na potência de saída ao longo do tempo.	43
Figura 23 – Curva de velocidade ao longo do tempo do motor Stirling sem carregamento	44
Figura 24 - gráfico teórico obtido segundo a análise de Schimidt	45
Figura 25 - Influência da temperatura do cilindro quente na potência de saída ao longo do tempo pela análise de schimidt	45
Figura 26. Influência do ângulo de fase no trabalho líquido produzido por ciclo.	46
Figura 27 - Arranjo físico do motor stirling tipo alfa	54
Figura 28 - Arranjo esquemático com as principais variáveis do motor Stirling tipo beta	58
Figura 29 - Arranjo esquemático com as principais variáveis do motor Stirling tipo gama	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de entrada para análise do teorema de Schmidt	30
Tabela 2 - Condições de usinagem para o processo de fabricação de torneamento	33
Tabela 3 - Condições de usinagem para o processo de fabricação de fresamento	34
Tabela 4 - Principais parâmetros de saída com base no teorema de Schimidt	44

SIMBOLOGIA

T_{max}	Temperatura máxima do ciclo Stirling
T_{min}	Temperatura mínima do ciclo Stirling
P	Pressão do motor
V_{se}	Volume percorrido pelo pistão de expansão ou de deslocamento
V_{sc}	Volume percorrido pelo pistão de compressão ou de dependência
V_{de}	Volume morto do espaço de compressão
V_r	Volume do regenerador
V_{dc}	Volume morto do espaço de compressão
V_c	Volume momentâneo do espaço de compressão
V	Volume total momentâneo
M	Massa total do gás de trabalho
R	Constante de gás
T_e	Temperatura do gás no espaço de expansão
T_c	Temperatura do gás no espaço de compressão
T_r	Temperatura do gás no regenerador
D_x	Ângulo de fase
t	Temperatura relativa
v	Volume percorrido relativo
X	Volume morto relativo
N	Rotação do motor
E_e	Energia indicada de expansão
E_c	Energia indicada de compressão
E_i	Energia indicada

P_e Potência indicada de expansão

P_c Potência indicada de compressão

P_i Potência indicada

H Eficiência indicada

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

- EPE Empresa de Pesquisa Energética
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IEA International Energy Agency
- NASA National Aeronautics and Space Agency
- STM Stirling Thermal Motors

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Caracterização do Problema.....	14
1.2	Objetivos.....	17
1.3	Justificativa.....	17
1.4	Conteúdo do trabalho.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	Ciclo Stirling.....	19
2.2	Características mecânicas.....	20
2.2.1	Arranjos construtivos usuais.....	21
2.3	Componentes dos motores.....	22
2.4	ANÁLISE TEÓRICA DO CICLO.....	24
2.4.1	Análise de Schmidt.....	24
2.4.2	Análise do ângulo de fase.....	26
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	SELEÇÃO DE MATERIAIS E DIMENSIONAMENTO.....	27
3.1.1	Dimensionamento.....	30
3.1.2	Seleção de Materiais.....	31
3.2	FABRICAÇÃO.....	33
3.2.1	Torneamento.....	33
3.2.2	Fresamento e furação.....	34
3.3	BANCADA DE MEDIÇÕES.....	34
3.4	Estudo do Motor.....	35
4	resultados e discussões.....	38
4.1	Influência da técnica de fabricação.....	38
4.2	Resultado da Influência da temperatura do cilindro aquecido na potência de saída.....	42
4.3	Influência do ângulo de fase.....	46
5	Conclusão.....	47
5.1	Influência da técnica de fabricação.....	47
5.2	Resultado da Influência da temperatura do cilindro aquecido na potência de saída.....	48
5.3	Influência do ângulo de fase.....	48
6	Sugestões.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE A: – Equações de Schmidt aplicado aos arranjos construtivos dos motores stirling.....	53
	APÊNDICE A1: MOTOR STIRLING TIPO ALFA.....	53
	APÊNDICE A2: MOTOR STIRLING TIPO BETA.....	58
	APÊNDICE A3: MOTOR STIRLING TIPO GAMA.....	61
	6.1.1 Eficiência, Potência Indicada e Energia.....	63

APÊNDICE A: projeto de fabricação DO MOTOR STIRLING tipo gama.....	66
APÊNDICE A1: VISTA EXPLODIDA DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA	66
APÊNDICE A2: VISTA DETALHADA DO FECHAMENTO LATERAL	67
APÊNDICE A3: CILINDRO DE AQUECIMENTO	68
APÊNDICE A4: CILINDRO DE POTÊNCIA	69
APÊNDICE A5: BASE SUPORTE DE TRANSMISSÃO	70
APÊNDICE A6: BASE SUPERIOR DE SUSTENTAÇÃO	71
APÊNDICE A7: BASE INFERIOR DE AQUECIMENTO	72
APÊNDICE A8: BASE INFERIOR DE SUSTENTAÇÃO	73
APÊNDICE A9: MONTAGEM CÂMARA DE DESLOCAMENTO	74
APÊNDICE A10: CILINDRO DE DESLOCAMENTO	75
APÊNDICE A11: BUCHA DA HASTE DE DESLOCAMENTO	76
APÊNDICE A12 : MONTAGEM HASTE DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA	77
APÊNDICE A13 : HASTE DE POTÊNCIA	78
APÊNDICE A14 : ARTICULAÇÃO DE DESLOCAMENTO	79
APÊNDICE A15 : PISTÃO DE POTÊNCIA	80
APÊNDICE A16 : ARTICULADOR DO PISTÃO DE POTÊNCIA	81
APÊNDICE A17 : MONTAGEM HASTE DE TRANSMISSÃO DE DESLOCAMENTO	82
APÊNDICE A18 : ARTICULADOR DO PISTÃO DE DESLOCAMENTO	83
APÊNDICE A19 :HASTE DE DESLOCAMENTO	84
APÊNDICE A20 : MONTAGEM SISTEMA DE TRANSMISSÃO	85
APÊNDICE A21 : VOLANTE DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA	86
APÊNDICE A22 :VOLANTE DE TRANSMISSÃO DE DESLOCAMENTO	87
APÊNDICE A23 :BASE DE TRANSMISSÃO PRINCIPAL	88
APÊNDICE A24 :BASE DE TRANSMISSÃO INFERIOR	89
APÊNDICE A25 : MONTAGEM DO DESLOCADOR EM VISTA EXPLODIDA	90
APÊNDICE A26 : MONTAGEM DO DESLOCADOR	91
APÊNDICE A27 : DESLOCADOR PRINCIPAL	92
APÊNDICE A28 :TAMPA DODESLOCADOR	93
APÊNDICE A29 :MONTAGEM DO CONECTOR DAS CÂMARAS	94
APÊNDICE A30: CONECTOR DAS CÂMARAS	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do Problema

Os motores tem por objetivo a geração de trabalho útil. A maior parte dos motores produz trabalho através da combustão interna. Esses motores são de baixa eficiência, são cada vez mais modernos e complexos, tanto a parte mecânica como eletrônica, além de gerar resíduos que afetam o meio ambiente. Os motores Stirling são uma alternativa para estes obstáculos, ele não deixa de ser complexo e necessitar de novas tecnologias, no entanto permite uma construção mais rudimentar e, além disso, o fluido de trabalho permanece contido entre os pistões. Por isso pode ofertar boa eficiência operacional, baixa complexidade de componentes eletrônicos e mecânicos e alta versatilidade, se comparado aos motores convencionais.

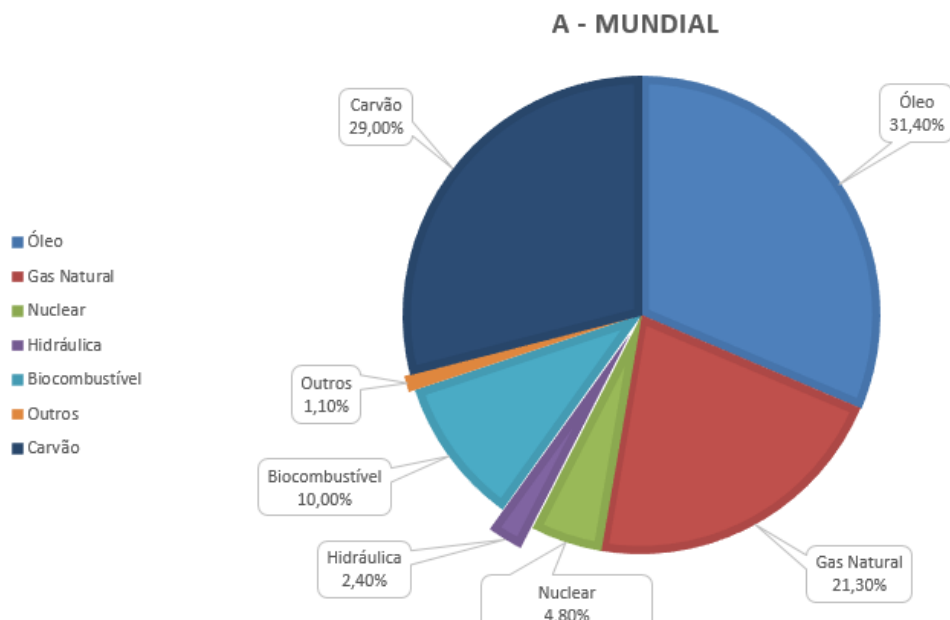
Foi em meados de 1816 que Robert Stirling registrou a primeira patente para o motor, por isso a homenagem colocando o seu nome na invenção. Na verdade existiam motores Stirling elementares, mas foi Robert Stirling quem adicionou um dispositivo que ele chamou de economizador. Nos dias atuais este dispositivo se chama regenerador, e tem por finalidade aumentar o rendimento e a eficiência desses motores. A adição desse dispositivo permitiu que o motor Stirling mantivesse um crescente aumento de interesse em sua época, no entanto, com o passar dos anos, as limitações metalúrgicas e de processos da época não o tornaram viável e logo os motores de combustão interna e a vapor conseguiram suprir a necessidade de altas potências.

Hoje, o motor Stirling recebe um interesse renovado como meio de geração de eletricidade, uma vez que a complexidade tecnológica e novos tipos de materiais fazem a fabricação do motor e seu estudo uma solução para os problemas causados por motores de combustão interna. O motor Stirling pode trabalhar com energia renovável e isso chama a atenção, já que converte uma enorme variedade de fontes de calor, como, por exemplo, a luz solar focada na câmara de aquecimento gerando calor e, conseqüentemente, convertendo em trabalho. As vantagens não se limitam a isto, esses motores podem ser adaptados às centrais térmicas existentes, já que podem eliminar calor residual proveniente dos sistemas de refrigeração para gerar eletricidade. O motor Stirling é também um sistema reversível; dependendo da forma

de energia cedida para o sistema e o ângulo de fase, ele pode funcionar como uma bomba de calor ou como um sistema de refrigeração. (ANGELINO,1996).

Esses motores têm suscitado o interesse de empresas como a NASA, por ter aplicações espaciais, porquanto a fonte de calor para o motor pode ser a luz solar, como já dito. Seu alto potencial de versatilidade e sua relativamente simples construção mecânica tornam a ideia para o uso no espaço uma realidade. Além disso, eles não produzem nenhum resíduo ou tipo de escape que possa gerar alguma perturbação mecânica. (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*)

A agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*) nos últimos anos publicou um relatório *Key World Energy Statistics* (IEA, 2014) que, em meados de 2012, pelo menos 81,7 % da produção de energia elétrica mundial ocorria a partir de fontes fósseis, tais como gás, óleos e carvão, e apenas 2,4% são geradas por fontes de energia limpa. As centrais hidráulicas e as demais fontes de energia sustentável se reduzem a um valor desproporcional de apenas 1,1%. Este fato pode ser comprovado analisando a Figura 1(a).



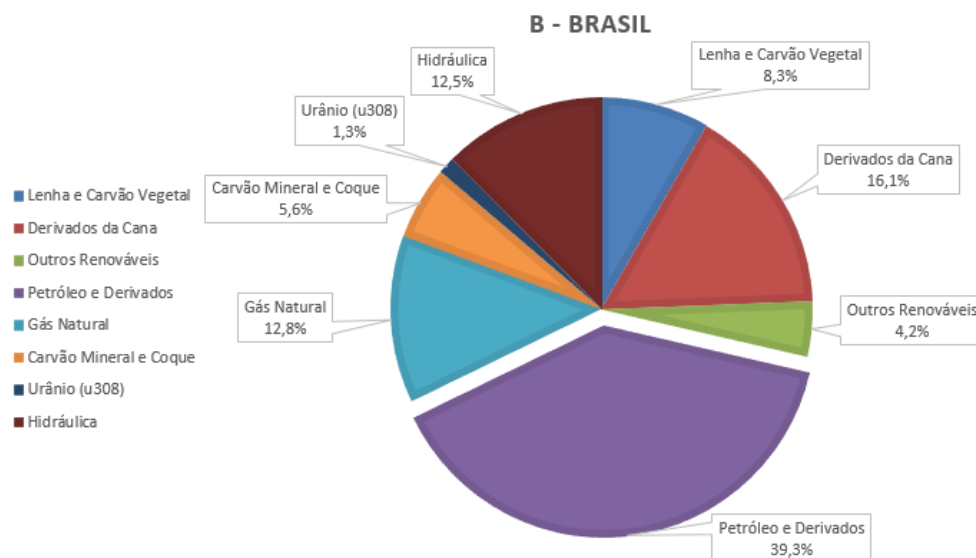


Figura 1. Estrutura da oferta interna de eletricidade no mundo em 2012 (figura a) e no Brasil em 2013 (figura b).

Fonte: adaptado de <http://www.iea.org>

Através da Figura 1(b), o cenário brasileiro mostra-se semelhante em alguns aspectos. No balanço Energético Nacional referente ao ano de 2013, a empresa de pesquisa energética (EPE) informou que, no Brasil, 12,5 % correspondem a energia hidráulica, 8,3 % a biomassa e 4,2 % a outras fontes de energia. Segundo esses dados, pode-se notar que as fontes de geração de energia elétrica, no Brasil, são mais sustentáveis se comparado ao resto do mundo, pois utilizam basicamente hidroelétricas como forma de geração de energia elétrica. No entanto, as dificuldades geradas para criação de novas usinas, singularmente envolvendo discussões ambientais referentes ao alagamento de grandes áreas e à desapropriação de reservas legalmente indígenas, podem ser algumas das limitações para o aproveitamento dos recursos hídricos do Brasil.

Nesses casos, quando as limitações energéticas se mostram um problema, pode-se empregar geradores de energia elétrica, tais como um acessível gerador a diesel. No entanto, o custo, o acesso ao combustível e a manutenção fazem dessas fontes uma má opção se comparado ao uso do motor Stirling que pode, por exemplo, ser adaptado a um fogão rudimentar em que a fonte de energia possa ser a biomassa.

Portanto, com base na análise acima apresentada, o objetivo deste estudo é construir um motor Stirling para geração de energia elétrica. O tema, apesar de abranger todas as grandes áreas da engenharia mecânica, será desenvolvido com foco em engenharia de fabricação.

1.2 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é a fabricação de um motor Stirling didático tipo gama sem regenerador dimensionado pelo teorema de Schimdt, utilizando como fluido de trabalho o ar. Para tal, foi levado em consideração o custo do motor utilizando uma escala pequena de elementos mecânicos. Com isso, pode-se posteriormente aumentar a escala alcançando uma equivalência maior de trabalho útil.

Será aplicado o teorema de Schmidt como uma ferramenta para o dimensionamento do motor, trabalhos já realizados serão consultados para completar o dimensionamento do projeto. O trabalho seguiu os seguintes tópicos:

- 1) Revisão:
- 2) Projeto:
- 3) Fabricação do Motor:
 - a. Motor de média potência utilizando peças Comerciais.
 - b. Motor de pequeno porte caso o item (a) não funcione.
- 4) Após a fabricação e o teste de funcionamento, será realizada a documentação das medições obtidas
- 5) Estudar o funcionamento e o desempenho de parâmetros chave (Temperatura, ângulo de fase e etc.) do motor e realizar um projeto documentado.

A análise de Schimdt será empreendida para verificação das relações entre os parâmetros construtivos e de operação do motor. Por fim, será confrontado com os dados reais obtidos através da literatura.

1.3 Justificativa

Percebe-se através da explanação anterior que são vários os fatores relacionados a necessidade de se desenvolver novas formas de geração de eletricidade, como, por exemplo, a elaboração de um motor Stirling. Atualmente esses motores vem passando por uma renovação tecnológica permitindo, portanto, seu desenvolvimento. O fato é que os motores Stirling vem se tornando uma alternativa. Como já mencionado, novos materiais e a complexa gama de dispositivos eletrônicos e mecânicos permitem aprimorar a capacidade de geração de energia do motor. Por exemplo, hoje se tem materiais que suportam temperaturas nunca antes alcançadas. Os novos softwares e análises numéricas, aliados às tecnologias de fabricação, vem tornando o motor Stirling uma solução sustentável para geração de a energia elétrica.

De acordo com Barros, é possível perceber a importância e versatilidade desses motores:

“Através dos novos interesses pela tecnologia, houve um reaparecimento comercial do motor. O motor Stirling utilizado no trabalho é um motor comercial, de fabricação alemã, de configuração alfa, com uma potência nominal de 9 kW, podendo operar com cogeração. O motor é avaliado originalmente para trabalhar com GLP e gás natural, também se tem versão do motor para coletores parabólicos solares.”
(BARROS, R. W. 2005, p 24)

1.4 Conteúdo do trabalho

Neste item será apresentado um resumo das principais etapas abordadas em cada capítulo deste trabalho. Os capítulos a seguir estão divididos de forma a facilitar a compreensão das fases e procedimentos abordados.

O capítulo 1 é uma introdução e apresenta um cenário da situação energética mundial e sua evolução com o passar dos anos, bem como um breve histórico de desenvolvimento do motor Stirling.

O capítulo 2 apresenta uma abordagem teórica enfatizando as várias configurações de motores Stirling, os ciclos termodinâmicos com suas respectivas análises e o teorema de Schmidt aplicados as configurações dos motores.

O capítulo 3 se refere a metodologia utilizada para a realização deste trabalho. É feito o dimensionamento do motor segundo o teorema de Schimidt. O projeto 3D é, então, apresentado com seus respectivos elementos e submontagens. É, então, realizada a seleção de materiais adequados conforme a solicitação do projeto.

O capítulo 4 é destinado à apresentação dos resultados e discussões referente a este trabalho, bem como uma abordagens qualitativa, quantitativa, e eventuais modificações.

O capítulo 5 é atribuído à apresentação das conclusões alusivas a este trabalho, bem como o capítulo 6 referente a sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conceito de ciclos termodinâmicos se refere a uma sucessão de etapas em que um volume de controle é submetido para que seu estado inicial coincida com o final. O sistema é constituído por um fluido de trabalho, e quando não há variação da massa interna do sistema, pode-se dizer que o sistema é fechado. (MORAN; SHAPIRO, 2009, p. 55).

2.1 Ciclo Stirling

Os motores Stirling apresentam os mesmos processos como qualquer outro motor, os quais são: compressão, aquecimento, expansão e resfriamento. Esses operam num ciclo termodinâmico regenerativo fechado, ou seja, um gás é contido dentro do motor e uma diferença de temperatura é aplicada entre as duas câmaras. Como o calor é aplicado ao sistema, o gás se expande e a pressão aumenta. O que força um dos pistões ao se deslocar e isso realiza trabalho. Esta análise pode ser visualizada através na Figura 2 e explicada posteriormente segundo Thombare (2008, p. 8).

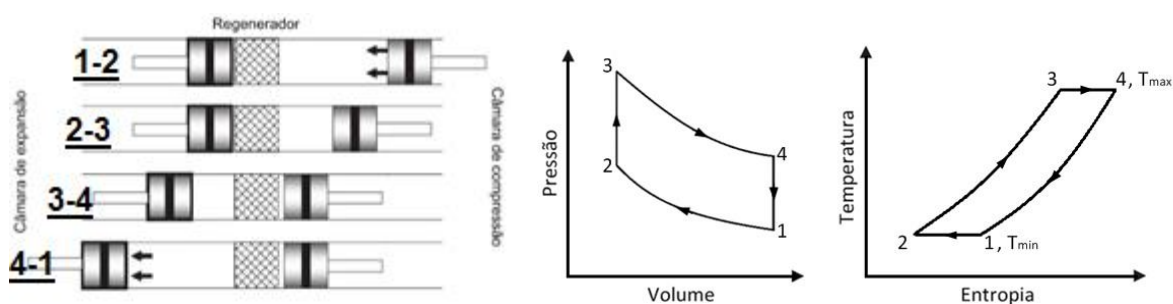


Figura 2 – O Ciclo Stirling e seus elementos realizando um ciclo completo.

Fonte: Adaptado de THOMBARE (2008, p. 7).

O ciclo, portanto, é composto por quatro etapas fundamentais:

Processo de compressão isotérmica 1-2: O pistão de compressão se move no sentido do regenerador, enquanto o pistão de expansão continua num estado estacionário. O fluido de trabalho é comprimido no espaço de compressão e a pressão aumenta de P_1 para P_2 , conforme pode ser visualizado na Figura 2. A temperatura é

mantida constante, ou seja, o processo é isotérmico. Não há qualquer mudança na energia interna e há uma diminuição na entropia. A pressão aumenta devido a redução de volume da câmara e o sistema perde calor para manter a temperatura em T_{min} .

Processo de aquecimento a volume constante 2-3: Os dois êmbolos movem-se, agora, simultaneamente, ou seja, no sentido do pistão de compressão para o pistão de expansão, de modo que o volume entre os êmbolos permanece constante, portanto: aquecimento a volume constante. A temperatura do fluido de trabalho é aumentada quando este passa pelo regenerador de T_{min} para T_{max} , por isso há um aumento da pressão do sistema de P_2 para P_3 .

Processo de expansão isotérmica 3-4: O pistão de expansão continua a se movimentar para longe do regenerador, enquanto que o pistão de compressão permanece estacionário. Como a expansão prossegue, a pressão diminui à medida que o volume aumenta de P_3 para P_4 . A temperatura é mantida constante através da adição de calor ao sistema pela fonte externa.

Processo de resfriamento a volume constante 4-1: Neste processo ambos os êmbolos se movimentam simultaneamente na direção da câmara de expansão. O calor é transferido do fluido de trabalho para o regenerador reduzindo a temperatura do fluido de trabalho para T_{min} .

2.2 Características mecânicas

Como visto anteriormente, os motores Stirling são constituídos de duas câmaras com diferentes temperaturas conectadas por um regenerador e trocadores auxiliares de calor. Esses elementos podem se combinar e formar arranjos mecânicos, os quais podem ser classificados como de ação simples ou dupla ação. (WALKER, 1980)

Motores de ação simples são compostos por conjunto de elementos que independentemente operam acoplados a um mesmo eixo de transmissão (virabrequim) ou outros mecanismos cinemáticos. Os motores de dupla ação são arranjos de vários cilindros nos quais podem ser vistos pela Figura 3 a seguir, a figura compara os tipos construtivos, ambos com igual número de cilindros e pistões:

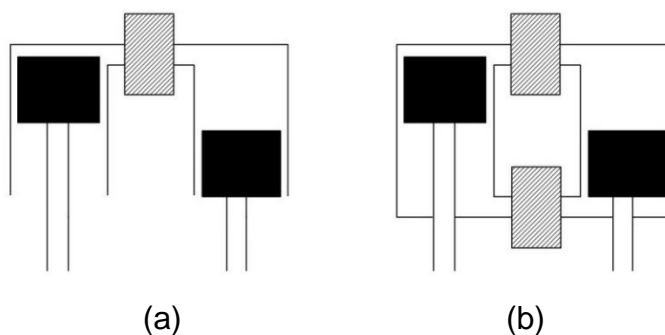


Figura 3 - Arranjos mecânicos de (a) simples ação e (b) dupla ação.
Fonte: WALKER (1980, p. 117 e 109).

2.2.1 Arranjos construtivos usuais

Originalmente, os tipos de motores Stirling foram classificados em três grupos de acordo com o sistema de classificação Kirkley-Walker: Alfa, Beta e Gama. Esses termos descrevem apenas as uniões de cilindros no motor Stirling. As câmaras de acoplamento identificam de qual forma o pistão de deslocamento e o pistão de potência estão ligados, no que diz respeito à conexão dos espaços de trabalho de volume variável. Estes são os espaços no interior do cilindro do motor, em que o fluido de trabalho é aquecido e resfriado, respectivamente (SANDFORT, 1962).

Um arranjo alfa dispõem de dois cilindros separados e cada pistão tem um impedimento contra vazamento, ou seja, ambos tem anéis de vedação. A potência saída é produzida pelo movimento separado dos êmbolos individuais. O grupo beta de motores Stirling, utiliza um único arranjo do cilindro. Por último, o arranjo gama é um híbrido dos arranjos alfa e beta. Os motores gama têm dois cilindros separados, tal como o alfa, mas a geração de energia é produzida do mesmo modo concebido nos motores beta, a Figura 4 faz referência às três disposições do motor Stirling. (URIELI, 2010)

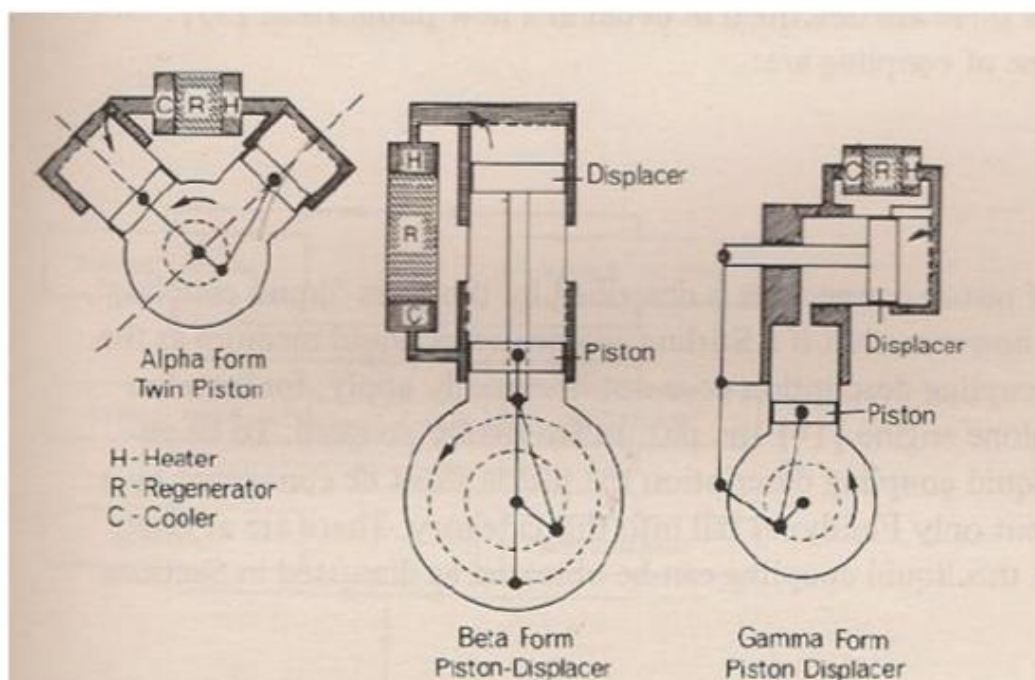


Figura 4 - A figura mostra os três tipos de motores Stirling: tipo alfa, tipo beta e tipo gama, respectivamente.

Fonte: (HOOPER e READER, 1983).

2.3 Componentes dos motores

Um desenho esquemático Figura 5 identifica os componentes utilizados em um motor Stirling tipo gama adotado neste trabalho, tipo escolhido por ter uma simples configuração e é de fácil fabricação em relação aos demais. Seus elementos são constituídos de ⑧ pistão de potência, ⑤ cilindro deslocador ou pistão deslocador, trocador de calor, fonte de calor, ① árvore de transmissão, fluido de trabalho e ⑩ anéis de vedação.

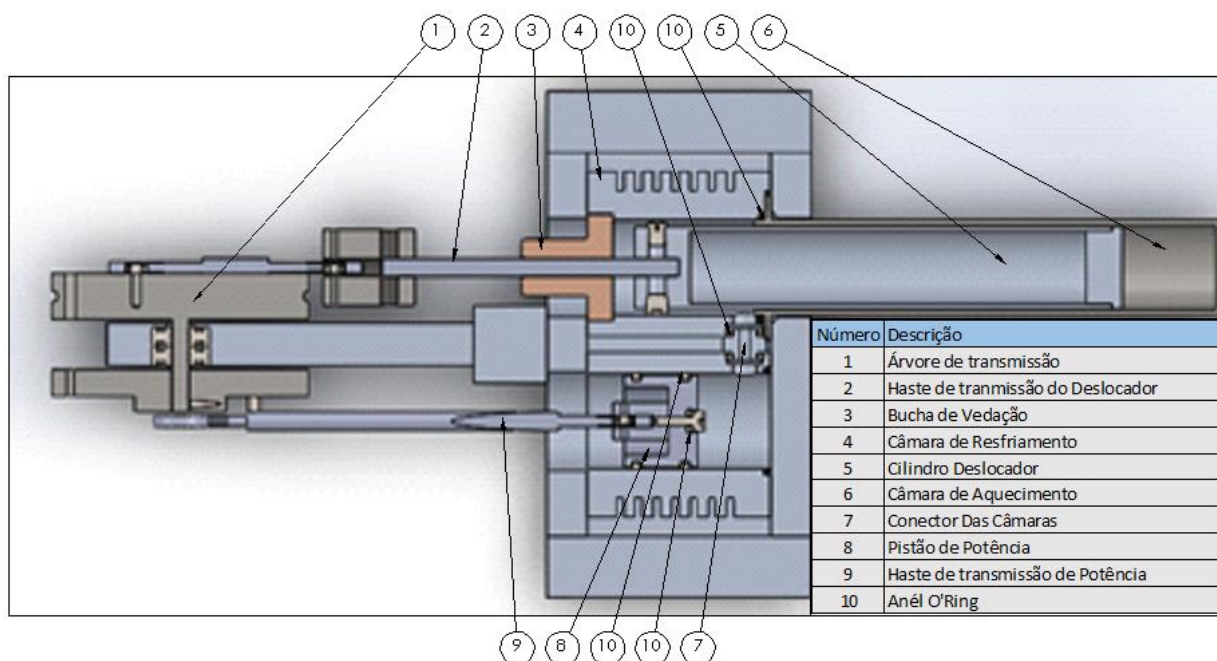


Figura 5 - Componentes que constitui um motor Stirling tipo gama

Fonte: Autoria própria.

Para alguns arranjos há um novo elemento chamado de ⑤ pistão de deslocamento de fluido, este elemento não interfere com o ⑥ cilindro de aquecimento, ou seja, a folga entre a camisa e este pistão é grande o suficiente para não gerar contato. Neste caso, a pressão na parte superior deste pistão se comparada com a da parte inferior é teoricamente a mesma. Portanto, como seu próprio nome diz, a função dele é deslocar fluido de trabalho entre as regiões de compressão e expansão. Em alguns casos, este elemento funciona como um regenerador, através da utilização de materiais ou formas que o fazem poroso.

Um aspecto importante para o funcionamento destes motores é o volume morto, o qual é necessário para acomodar os elementos do motor, e corresponde a até 50 % do volume interno total do gás. Dependendo da magnitude deste volume, ele pode gerar diferentes efeitos sobre a eficiência do motor. A alteração da magnitude pode, também, proporcionar um meio para controlar a potência de saída. (BRILL, ANNA 2012)

⑦ O diâmetro do conector que regula o fluxo de ar a partir do espaço de expansão para o espaço de compressão, também têm relações com a potência de saída. Torbjorn Bergstrom, um professor do Instituto Politécnico de Worcester - M. A. U.S.A., observou que em aplicações profissionais, o ponto de estrangulamento é frequentemente alterado como um meio de aceleração do motor. A eficiência também

depende da velocidade de trabalho, conforme a velocidade do motor aumenta as forças aerodinâmicas tornam-se um fator predominante, porque são proporcionais ao quadrado da velocidade, segundo Bril (2012). Para minimizar estes efeitos geralmente são empregados outros tipos de fluídos de trabalho, como o hidrogênio e o hélio. Porém, esses gases são difíceis de conter devido ao seu fácil escoamento, principalmente o hidrogênio devido a sua capacidade de se difundir através do material sólido e de fragilizá-lo. Por isso, algumas vezes os motores Stirling que trabalham utilizando esses gases são dispendiosos. (WALKER, 1980).

2.4 ANÁLISE TEÓRICA DO CICLO

Os ciclos termodinâmicos não representam fielmente a realidade, uma vez que são altamente idealizados. Foi Schmidt, nas últimas décadas do século XIX, quem concebeu uma estudo aplicada ao motor Stirling, e que, mais tarde, ficaria conhecida como análise clássica de Schmidt. Entretanto, esta verificação continua sendo bastante simples por considerar a compressão e expansão como processos isotérmicos (WALKER, 1980).

2.4.1 Análise de Schmidt

Em 1871, Gustav Schmidt criou a primeira análise teórica aplicável a motores Stirling. Tornando-se uma análise clássica para o ciclo, com certas aproximações que a torna uma abordagem razoável para o desempenho do motor. Todavia, são levantadas algumas condições de contorno para o sistema. Estas condições tornam a verificação simplificada, pois percebe-se que na prática o desempenho do motor é menor que 60% do desempenho predito pela teoria de Schmidt (ROGDAKIS, 2002).

Portanto, a teoria de Schmidt é frequentemente utilizada no estudo e compreensão dos motores Stirling, principalmente como uma etapa inicial para dimensionar os elementos que constituem o motor. (PAULA, R. B, 2005)

O desempenho é estimado utilizando-se um diagrama P - V . O volume do motor é calculado a partir da geometria dos elementos em estudo. Essa estimativa é feita pelo rearranjo da equação que envolve a observação feita para um gás ideal, e que é apresentada pela equação (1). O equacionamento é mostrado no Apêndice A, onde é desenvolvida a análise de Schmidt para os três arranjos do motor Stirling.

$$PV=mRT \quad (1)$$

Onde:

P = pressão - Pa

V =volume – m³

m = massa – kg

R = constante universal dos gases – J/kg. K

T = temperatura – K

As condições de contorno na análise da pressão do motor são:

- a) Não há perda de calor durante o ciclo, também não há diferença interna de pressão;
- b) São isotérmicos os processos de expansão e de compressão;
- c) Considera-se ideal o fluido de trabalho;
- d) O regenerador é ideal, ou seja, não há perdas de calor quando este existir;
- e) Os volumes mortos de expansão e de compressão mantêm as temperaturas T_e e T_c , respectivamente, constantes durante o ciclo;
- f) A temperatura do gás no regenerador é uma média da temperatura do gás na expansão T_e e na compressão T_c ;
- g) Os volumes de compressão e expansão comportam-se como uma função senoidal.

2.4.2 Análise do ângulo de fase

Diversos fatores que reduzem a eficiência do motor podem ser considerados e dentro dele se encontra o ângulo de fase. Em Walker (1980, p.62) apresenta uma série de estudos que consideram fatores que reduzem a eficiência do motor, dentre os quais pode-se citar as perdas térmicas, aerodinâmicas e aquelas decorrentes do escoamento. Estas perdas fazem com que ocorra uma variação das pressões e temperaturas instantâneas. Na Figura 6, é possível perceber a influência destas perdas na potência de saída.

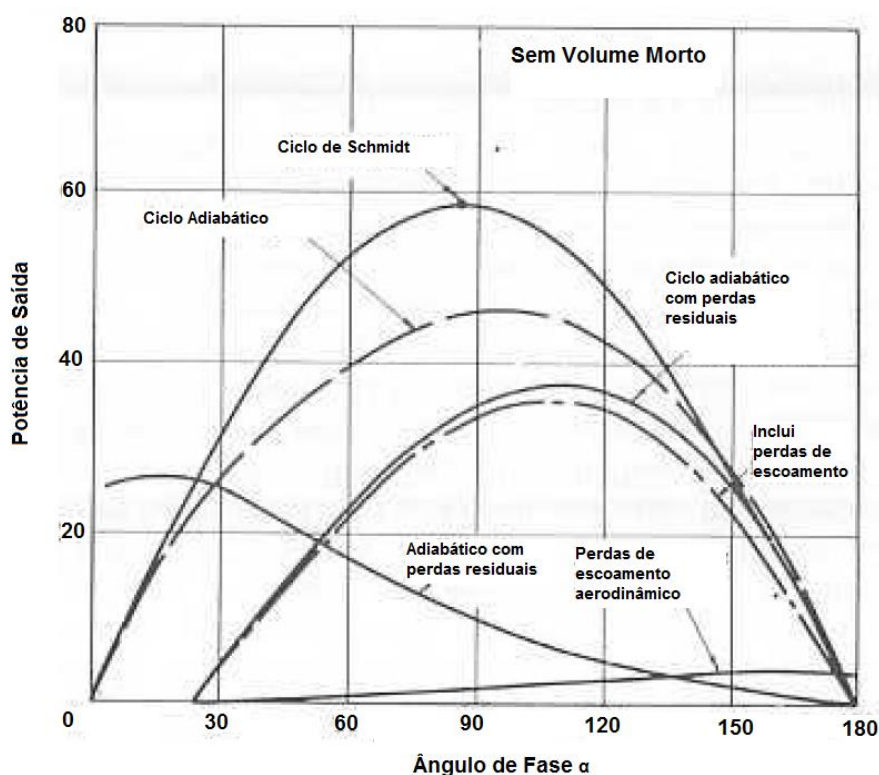


Figura 6. Influência das perdas sobre a potência de um motor sem volume morto.

Fonte: Adaptado de WALKER (1980, p. 62).

No modelo de Schmidt, onde essas perdas não são consideradas, o ângulo de fase que fornece maior potência é o ângulo de 90°. Em análises mais complexas o ângulo que maximiza a potência pode variar.

3 METODOLOGIA

Sabe-se que atualmente inúmeras pesquisas vem sendo publicadas a fim de se melhorar o rendimento dos motores Stirling, bem como visando a otimização de seu funcionamento.

Neste capítulo do trabalho serão discutidos alguns métodos para a fabricação do motor Stirling, tais como aplicação das equações do capítulo 2 para o dimensionamento, justificativas para a seleção de materiais e escolhas de formas construtivas para a fabricação do motor.

3.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS E DIMENSIONAMENTO

Primeiramente foram levantado aspectos construtivos dos motores Stirling e a possibilidade de se utilizar peças comerciais (Figura 7) para a fabricação do motor. Após esta etapa, foram calculadas as dimensões do motor juntamente com os tipos de elementos necessários para seu funcionamento.

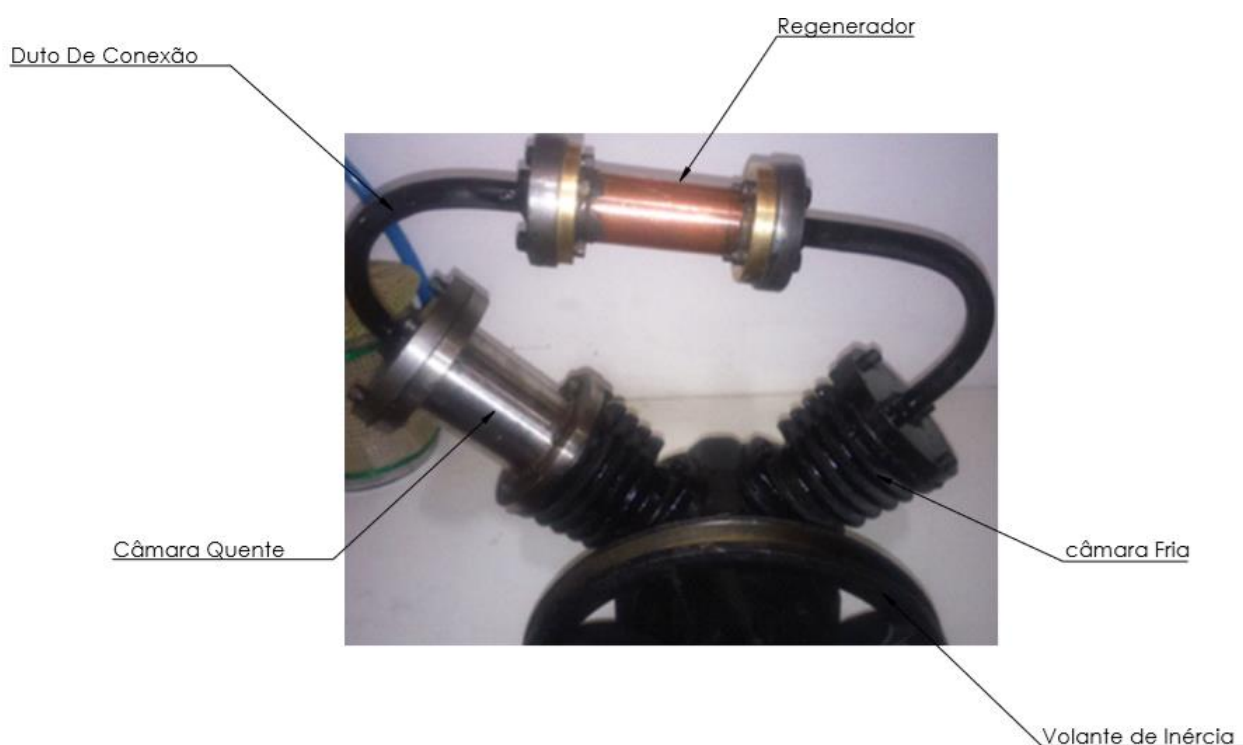


Figura 7 - Motor Stirling tipo alfa fabricado sem sucesso de funcionamento.

Fonte: Autoria própria

Foi necessário efetuar uma modelagem 3D utilizando o *software* comercial *SolidWorks*™. Por fim, com a ajuda de trabalhos anteriores, como de Ana Bril (2012), definiram-se quais tipos de materiais se adequariam ao projeto do motor. Na Figura 8, a seguir, é possível ver a forma esquemática da metodologia utilizada neste trabalho.

Na etapa de definições dos parâmetros do motor, bem como o estudo do teorema de Schmidt, foi importante para entendimento prático dos fenômenos envolvidos neste projeto. Lembrando que, como já dito, foi testada a fabricação de um motor Stirling tipo alfa sem sucesso de funcionamento (Figura 7), por isso optou-se por fabricar um motor Stirling tipo gama didático, de menor porte e de menor custo, de modo que a metodologia abordada neste trabalho se adequasse.

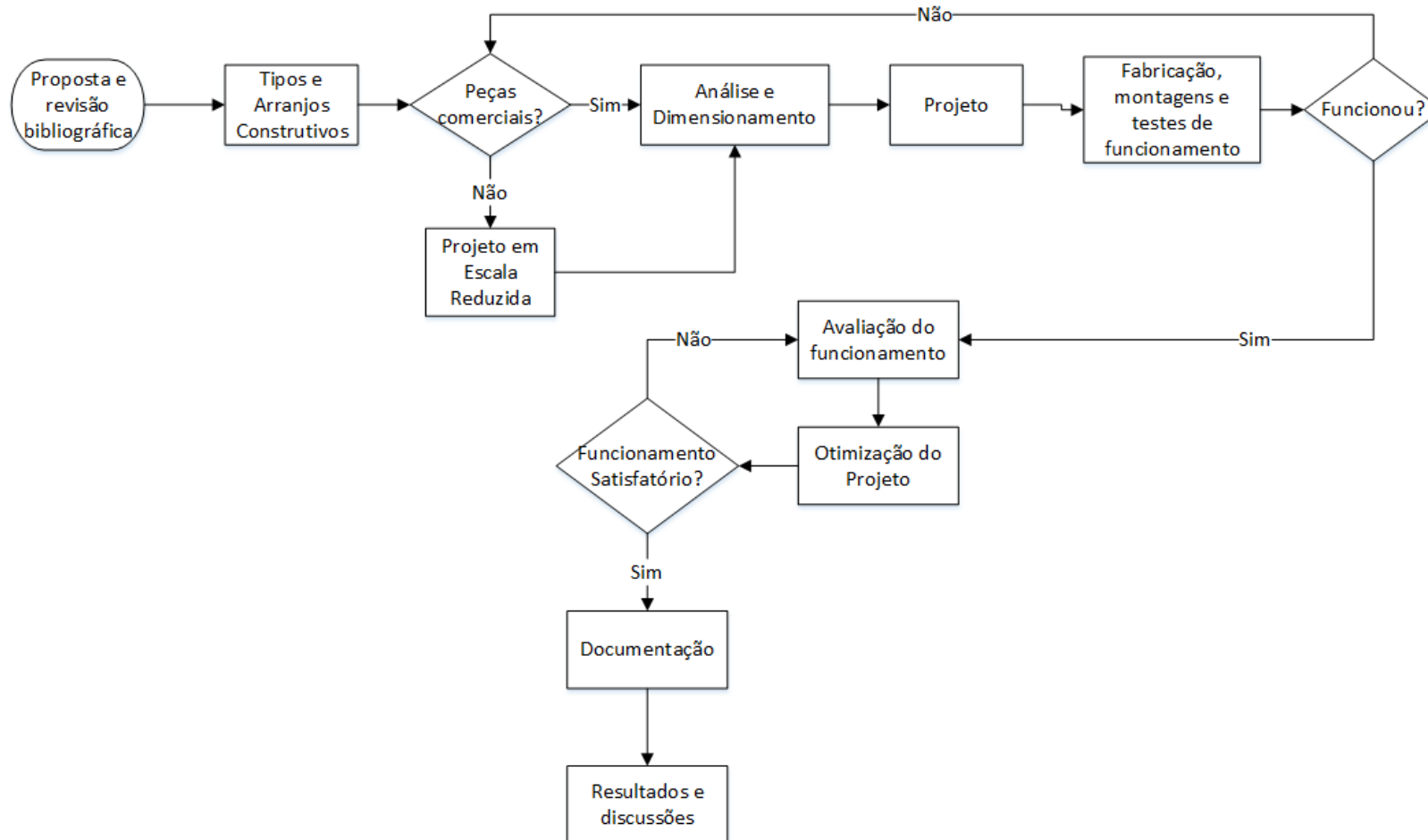


Figura 8 - Metodologia do projeto de fabricação do motor Stirling
 Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Dimensionamento

A tabela 1 a seguir mostra os parâmetros de entrada para a análise do teorema de Schmidt.

Tabela 1 - Parâmetros de entrada para análise do teorema de Schmidt

Parâmetros de entrada do motor	Variável	Unidade
Temperatura do gás no espaço de expansão	400	°C
Temperatura do gás no espaço de compressão	25	°C
Velocidade	800	rpm
Diâmetro do pistão de deslocamento	21,5	mm
Folga entre o pistão de deslocamento e o cilindro de deslocamento	0,25	mm
Comprimento do cilindro de deslocamento	130	mm
Curso do pistão de deslocamento	24	mm
Diâmetro do conector das câmaras	3,5	mm
Comprimento do conector	7	mm
Diâmetro do pistão de Potencia	25	mm

Fonte: Autoria própria.

As temperaturas de ingresso foram analisadas com base em trabalhos anteriores, como os de Ana Brill (2012).

A Erro! Fonte de referência não encontrada. a seguir mostra como foi montado o primeiro motor em escala reduzida com seus respectivos componentes.



Figura 9 - Motor stirling tipo gama testado pela primeira vez.

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Seleção de Materiais

Todos os componentes do motor, bem como suas respectivas montagens estão contidos no apêndice B deste trabalho. A Figura 10 a seguir se refere ao deslocador que tem por finalidade deslocar o ar da câmara quente para o espaço de resfriamento. Este dispositivo foi fabricado em liga de alumínio 2014-T6, com a haste em aço temperado e cromado. Este eixo, que conecta o pistão de deslocamento, é retificado e é comercialmente disponibilizado. Esse eixo tem precisão de centésimos de milímetros, por isso o emprego como um elemento de vedação. O desenho da montagem se encontra no apêndice B. Para resistir a altas temperaturas, a câmara de aquecimento foi fabricada em aço inoxidável AISI 304. A folga entre a câmara de aquecimento em relação ao cilindro de deslocamento é de 0,25 mm, reduzindo assim ao máximo o volume morto.



Figura 10 – Montagem do cilindro deslocador e a haste de aço, ambos utilizados para fabricação do motor Stirling tipo gama

Fonte: Autoria própria.

O bronze grafitado, comumente conhecido como bronze auto lubrificante, é empregado para locais onde é difícil a lubrificação. Neste caso, ele irá proporcionar

uma melhor vedação da câmara e também irá proporcionar propriedades de lubrificação para o motor. O processo de fabricação esta exemplificado pela Figura 11 e Figura 12.

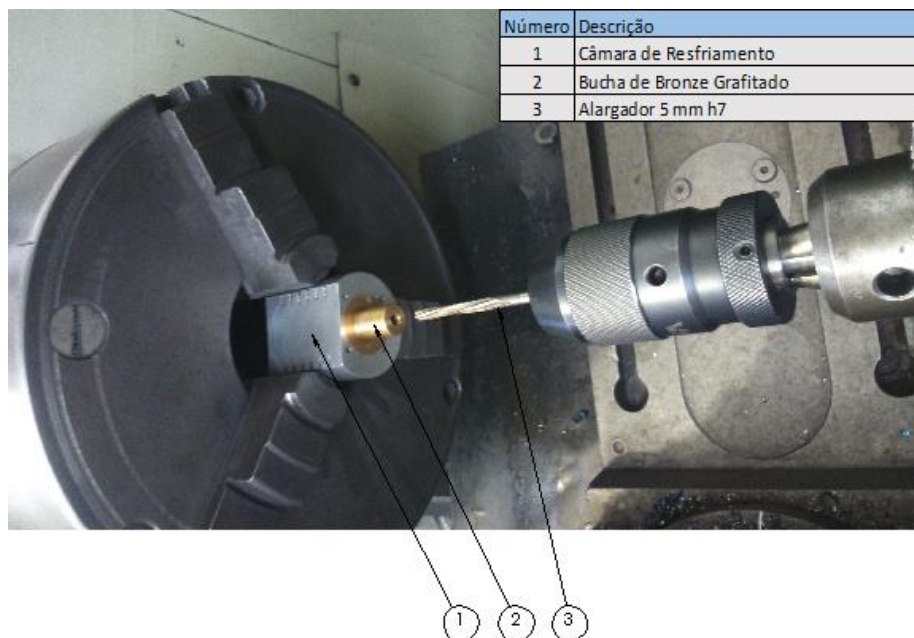


Figura 11 - Processo de usinagem da montagem da câmara de resfriamento com vedação de bronze grafitado.

Fonte: Autoria própria.

As câmaras do motor são feitas do material Al 2014-T6, pois é comercialmente fácil de se encontrar e também tem propriedades de condutibilidade térmica excelente e resistência mecânica boa.



Figura 12 - Processo de usinagem da câmara de resfriamento

Fonte: Autoria própria.

3.2 PROJETO E FABRICAÇÃO

Esta seção tem como objetivo descrever os parâmetros adotados para o processos de usinagem de modo que seja possível atingir as metas estabelecidas no que diz respeito às tolerâncias exigidas do projeto.

3.2.1 Torneamento

A máquina utilizada para o processo de torneamento foi um Torno Nardini Diplomat Nd 250 / 325, ano 2003. Os materiais metálicos utilizados que passaram pelo processo de torneamento foram: Ferro fundido, aço comum ao carbono e Alumínio. Utilizou-se suporte para toronar tipo MTJNR 2020 K16 com Insertos intercambiáveis para as seguintes operações:

Desbaste: TNMG 16 com inserto do tipo AH905 *tungaloy*

Acabamento: C7Z (fabricante NTK) cermet com cobertura de PVD.

Os parâmetros do processo (Tabela 2) foram adotados seguindo as recomendações do fabricante.

Tabela 2 - Condições de usinagem para o processo de fabricação de torneamento

	Velocidade de corte	Avanço	Ap
Desbaste	50 m/min	0,2 mm/rev	1 mm
Acabamento	120 m/min	0,05 mm/rev	0,1 mm

Fonte: Autoria própria.

O processo de usinagem foi realizado em condições de refrigeração abundante de modo que não danificasse a aresta de corte da ferramenta. Para a operação dos canais das aletas do motor, utilizou-se uma ferramenta de Bedame HSS 50% cobalto, com condições de usinagem $V_c=25$ m/min e refrigeração intermitente.

3.2.2 Fresamento e furação

A máquina utilizada para o processo de fresamento foi uma fresadora ferramenteira FVF 2000 ISO 30. Os materiais metálicos utilizados que passaram pelo processo de fabricação foram: Ferro fundido, aço comum ao carbono e Alumínio. O cabeçote intercambiável utilizado foi 50mm de diâmetro e adequado para o uso de insertos tipo tpcn-1603 do tipo AH725 *tungaloy* para o processo de desbaste e acabamento. O avanço e as velocidades de corte adotadas se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições de usinagem para o processo de fabricação de fresamento.

Material	Processo	Velocidade de corte (Vc)	Avanço (fz)	Profund. (ap)
Ferro fundido	Desbaste	140 m/min	0,3 mm / tt	1 mm
	Acabamento	140 m/min	0,3 mm / tt	0,1 mm
Liga de Alumínio 2014 – T6	Desbaste	180 m/min	0,2 mm / tt	1 mm
	Acabamento	180 m/min	0,2 mm / tt	0,1 mm
Aço comum	Desbaste	150 m/min	0,2 mm / tt	0,5 mm
	Acabamento	150 m/min	0,2 mm / tt	0,1 mm

Fonte: Autoria própria.

Para o processo de furação, utilizou-se a fresadora ferramenteira e o torno convencional, todavia utilizando como suporte um mandril de aperto rápido, conforme a Figura 11. As ferramentas utilizadas foram brocas de aço rápido e um alargador de 5mm h7. A velocidade de corte da broca de aço rápido foi mantida entre 45 a 110 m/min.

3.3 BANCADA DE MEDIÇÕES

O arranjo elétrico do sistema juntamente com a bancada de experimentos, onde foi possível medir a potência do sistema, é mostrado a seguir pela Figura 13. A

bancada foi fabricada utilizando aço estrutural. O posicionamento do motor, do gerador e do queimador foi calculado de modo que ficasse fácil sua montagem. Com a finalidade de calcular a potência eficaz fornecida pelo motor, foi necessário medir a tensão e a corrente elétrica do sistema. Para tanto, foi montado um circuito elétrico contendo um gerador 24 vdc e um resistor de 50 ohms ligado em série com o led, conforme a Figura 13. O resistor provoca uma queda de energia potencial fornecida pelo gerador elétrico, isso faz com que o gerador promova uma resistência ao movimento de rotação do motor Stirling, conseqüentemente exigindo torque para se movimentar e, como resultado, potência. A resistor elétrico foi selecionado com base em Chen (2014, pág. 70).

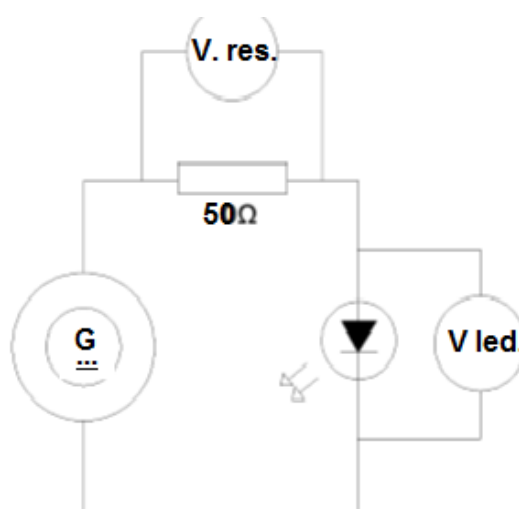


Figura 13 - Arranjo elétrico para medição da Potência fornecida pelo motor.
Fonte: Adaptado LUIZ,THIAGO,MARCELO (2013, pg. 39)

A equação que governa a montagem elétrica do sistema é a lei de Ohm. Portanto, a potência pode ser escrita da seguinte forma:

$$P_{motor} = (V_{led} + V_{res}) \cdot I \quad (25)$$

Medindo-se a corrente e a tensão total do sistema através de um multímetro é possível calcula-se a potência útil do motor.

3.4 Estudo do Motor

O motor foi testado a fim de avaliar seu desempenho, os problemas foram sendo resolvidos e melhorias potenciais foram sendo feitas ao longo dos testes de funcionamento até o momento em que os dados ficassem coerentes. Todo esse

esforço para que se pudesse reunir os dados de temperatura, ângulo de fase, velocidade e potência do motor. Na próxima Figura 9, apresenta a versão final do motor juntamente com a bancada de experimentos.

Nesta seção, pode-se notar as ferramentas e componentes necessários utilizados para o ensaio do motor, o layout e o procedimentos de teste. Os itens utilizados para testar o motor Stirling podem ser visualizados na figura Figura 14.

O queimador a gás é capaz de fornecer energia para o motor, simulando, portanto, um futuro funcionamento em ambientes rurais. A fim de iniciar o movimento do motor, foi necessário girar o volante de transmissão com uma das mãos a fim de fornecer uma energia de arranque necessária para se iniciar o ciclo. Para se avaliar a temperatura da câmara quente e da câmara fria, foi utilizado um termômetro digital. O teste do motor foi realizado a uma temperatura ambiente de 29 °C. O layout de ensaio de motores pode ser visto a partir da Figura 14, que mostra como o queimador a gás e a instrumentação foi organizada para a coleta de dados do motor. O procedimento descrito abaixo foi criado para assegurar confiabilidade e ao mesmo tempo permitir um método adequado para a coleta de dados.

1. Preparar e organizar as ferramentas e os componentes necessários para o funcionamento e a coleta de dados do motor
2. Configurar a instrumentação para a medição da temperatura, para a medição da RPM e para a medição das tensões do circuito elétrico.
3. Ligar o queimador a gás
4. Cronometrar o tempo e gravar os dados no hardware
5. Mapear a temperatura da fonte quente e da fonte fria.
6. Após certo tempo de aquecimento, iniciar o movimento de ignição do motor
7. Fazer a leitura de RPMs, tensão elétrica e temperatura.
8. Verificar e analisar o funcionamento do motor ao longo do tempo
9. Avaliar o efeito do ângulo de fase

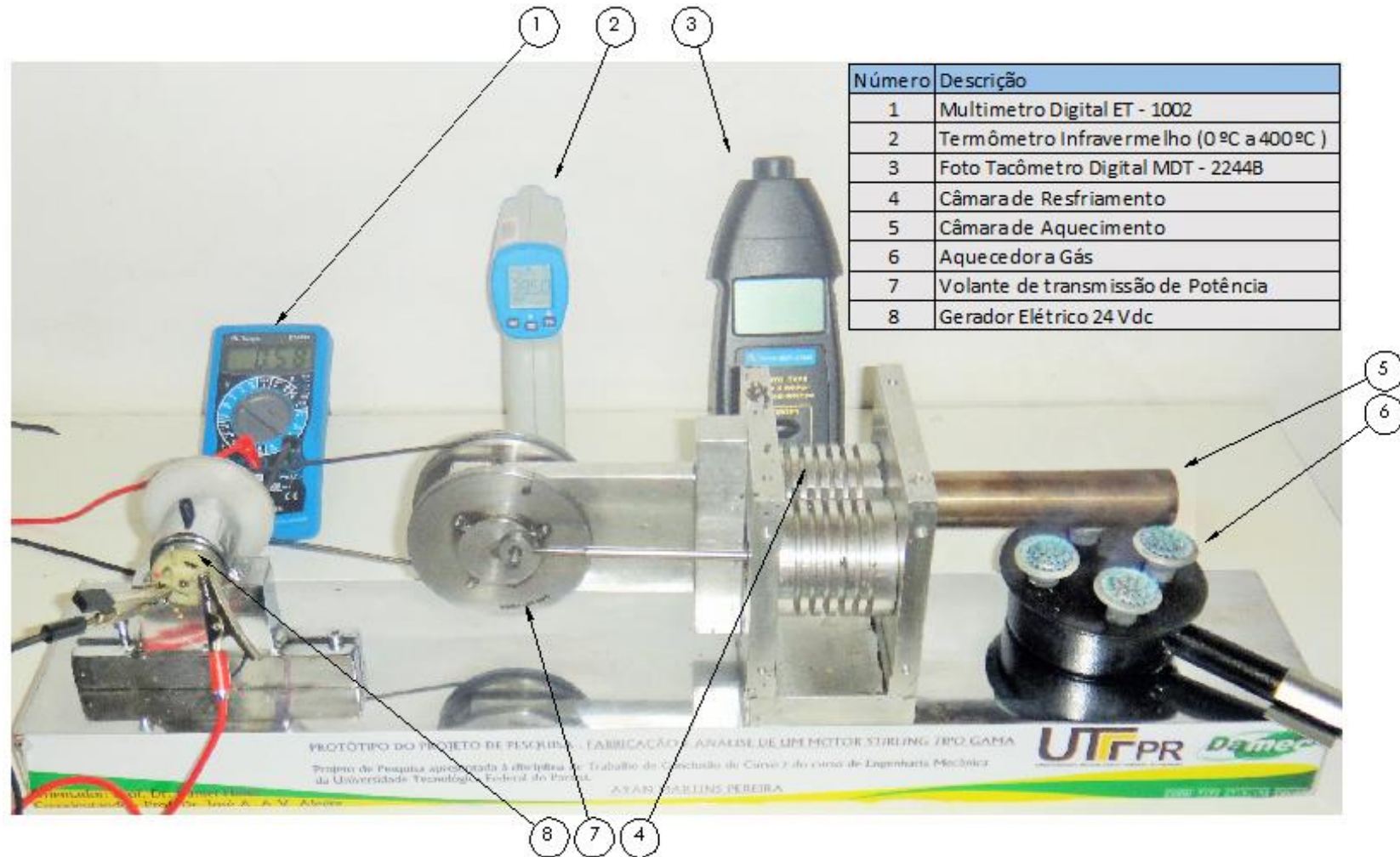


Figura 14 - Bancada de experimentos do Motor Stirling
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão discutidos aspectos fundamentais envolvendo o funcionamento e o estudo do motor Stirling. E, por fim, será discutido em cada subseção as causas e os efeitos dos parâmetros de funcionamento do motor, como velocidade, ângulo de fase, temperatura das câmaras e potência de saída

4.1 Influência da técnica de fabricação

As técnicas de fabricação influenciaram no funcionamento do motor, desde a árvore de transmissão até a fonte de calor. Por isso, vale a pena salientar que qualquer tipo de vazamento existente no motor influi na potência de saída.

O pistão de potência foi fabricado utilizando como material o ferro fundido e o alumínio. Este último utiliza anéis *O'rings* como forma de vedação. O ferro fundido tem propriedades de fácil usinagem e, também, de ser auto lubrificante. Os dois tipos foram testados no funcionamento do motor.



Figura 15 - Pistão de potência feito inicialmente utilizando ferro fundido e posteriormente utilizando alumínio com vedação de anel O'ring de tamanho número 13.

Fonte: A autoria própria.

A fabricação das câmaras de resfriamento e do pistão de potência seguiu a sequência mostrada na Figura 16. Primeiramente (a) é possível notar o processo de torneamento das aletas e da furação interna. Neste caso, foi utilizada uma ferramenta de abrir canais (bedame) para sangramento das aletas que têm como função

aumentar a dissipação de calor. Em (b) é possível notar o faceamento das câmaras no processo de fresamento, onde foi utilizada uma rotação alta para uma melhor usinagem e, conseqüentemente, uma superfície com acabamento excelente essencial para a vedação do motor. Em (c), percebe-se o processo de furação e rosqueamento, onde posteriormente a câmara seria fixada à base do motor. Por último (d), as câmaras prontas para a montagem na base superior e inferior conforme descrito no projeto que se encontra no apêndice B.

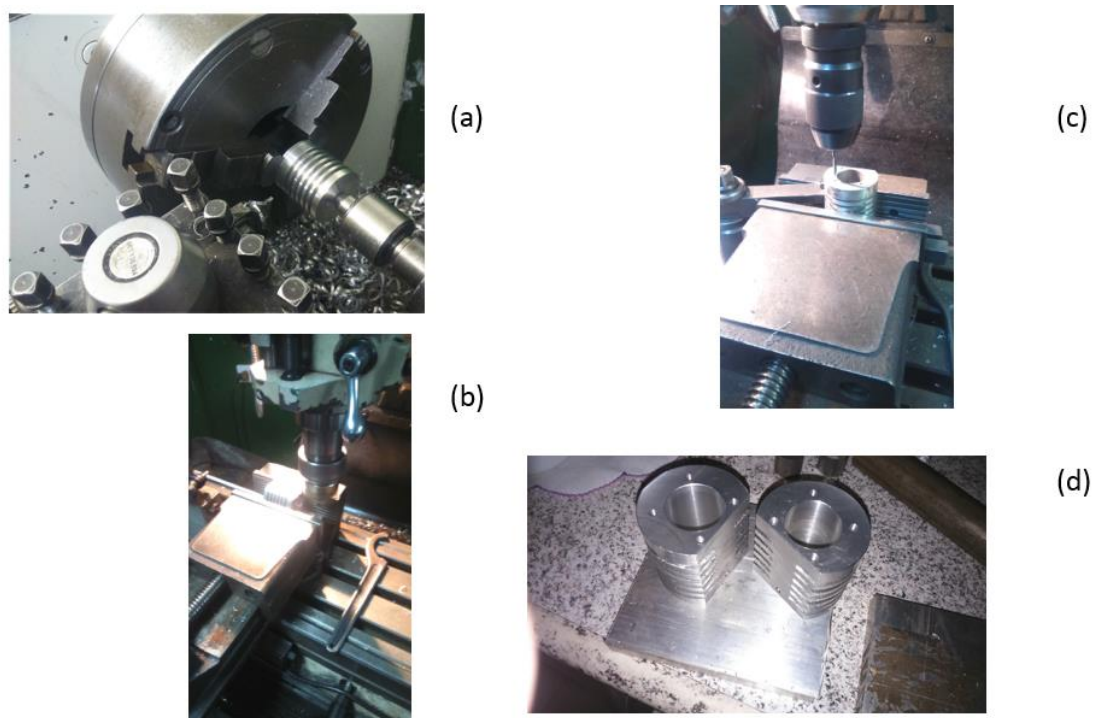


Figura 16 - Processo de fabricação das câmaras

Fonte: Autoria própria.

Para a fabricação da base do motor foi utilizado primeiramente o processo de fresamento, onde foi possível realizar as furações. Posteriormente partiu-se para o processo de usinagem. Na Figura 17, é possível verificar os respectivos processos.

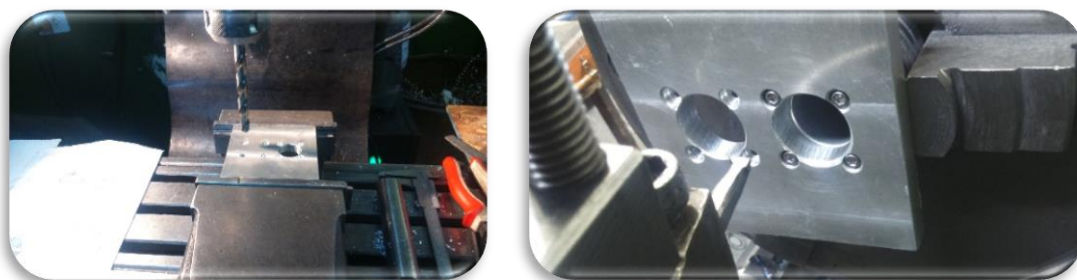


Figura 17 - Processo de furação e posteriormente torneamento da base do motor
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18, o processo de torneamento da árvore de transmissão é mostrado, onde foi utilizado material em aço carbono.



Figura 18 - Processo de torneamento da árvore de transmissão de potência
Fonte: Autoria própria.

O eixo de transmissão juntamente com o virabrequim são mostrados no Apêndice B. O arranjo da montagem para que pudessem ser utilizados ângulos de defasagem entre o pistão de potência e o pistão de deslocamento foi um diferencial importante neste trabalho.

O bronze grafitado neste projeto não desempenhou um papel desejado no que diz respeito à resistência mecânica, pois com o motor em funcionamento e o peso

considerável do deslocador resultou em um desgaste precoce ocasionando uma pequena folga entre a haste do deslocador e o bronze grafitado gerando perda de eficiência. Portanto, a recomendação é que se aumente a distância da árvore de transmissão, ou procurar materiais com resistência mecânica maiores e que tenha as mesmas propriedades de lubrificação ou diminuir o peso do cilindro deslocador.

O pistão de potência fabricado em ferro fundido funcionou ligeiramente melhor do que utilizando anel *O'ring*, pois como o motor entrava em vibração devido ao desbalanceamento rotativo, isso ocasionava, no pistão com vedação de anel *O'ring*, vazamento por falta de alinhamento. Isso gerou oscilações nos dados experimentais, por isso todos os dados foram coletados utilizando o pistão de potência fabricado em ferro fundido. Para eliminar este problema, a recomendação é que se use guias de modo que seja eliminada este desalinhamento ou elimine o desbalanceamento rotativo.

O cilindro deslocador fabricado em alumínio não foi uma boa opção, pois como o material tem uma condutividade térmica alta, isso acabou influenciando a temperatura da fonte quente na fonte fria e, portanto, ao longo do tempo, o motor foi perdendo a sua eficiência. Na Figura 19 é possível visualizar os componentes desmontados que fazem parte do motor Stirling tipo gama.



Figura 19 - Conjunto de peças e submontagens utilizadas para funcionamento do motor Stirling tipo gama

Fonte: Autoria própria.

Também, outro fator importante foi o atrito devido a transmissão, conforme a Figura 20, percebeu-se que utilizando pequenos rolamentos houve uma mudança significativa de velocidade gerada pelo motor. Isso se deve ao fato que, no caso da transmissão sem uso do rolamento, ocorreu atrito dificultando o funcionamento do motor e, como o atrito do sistema está próximo à ordem de grandeza da potência gerada pelo conjunto, isso dificulta o seu desempenho. Portanto, quanto menor atrito gerado pelo protótipo maior será sua potência fornecida. Uma das causas do não funcionamento do modelo tipo alfa fabricado inicialmente foi o atrito gerado entre os anéis de vedação com a camisa do pistão.

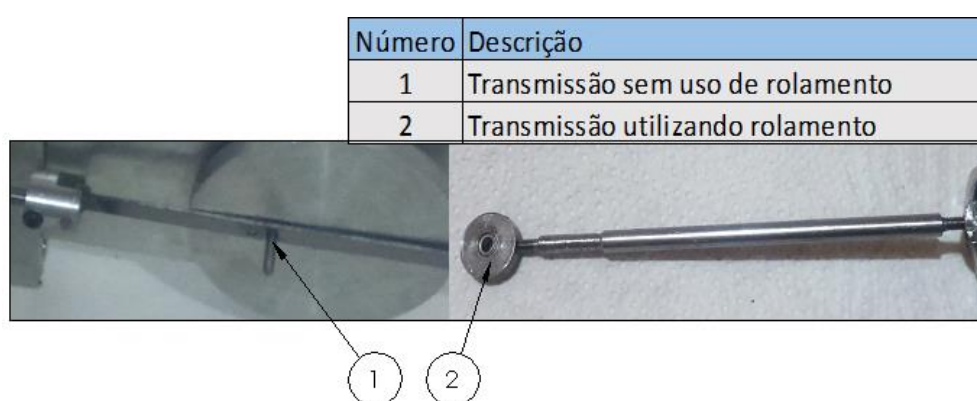


Figura 20 - Sistema de transmissão de movimento (virabrequim) utilizado no projeto
Fonte: Autoria própria.

O sistema de transmissão foi projetado de modo que o curso do pistão de potência ficasse 25% menor que o curso do cilindro deslocador. Utilizou-se esta estratégia, pois percebe-se um aumento de eficiência térmica do motor. (SANT'ANNA, YANO. 2012. pág. 90)

4.2 Resultado da Influência da temperatura do cilindro aquecido na potência de saída

Os primeiros testes de funcionamento relacionam o tempo de funcionamento com a temperatura do local de aquecimento. Com o aumento da temperatura do cilindro aquecido, neste caso é natural que ocorra um aumento do trabalho líquido por ciclo. Portanto, a potência de saída possui comportamento bastante próximo àquele observado por Walker (1980, p. 95) na Figura 6. O aumento na temperatura do cilindro

aquecido aumenta a potência fornecida pelo motor, segundo pode ser observado nas Figura 21 e Figura 22.

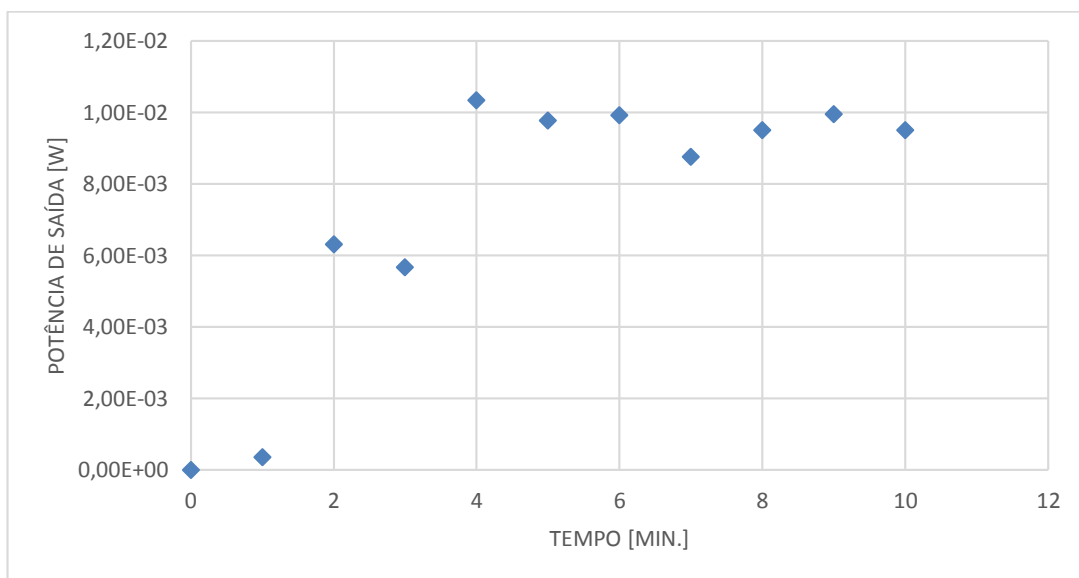


Figura 21 - Funcionamento do motor ao longo do tempo

Fonte: Autoria própria.

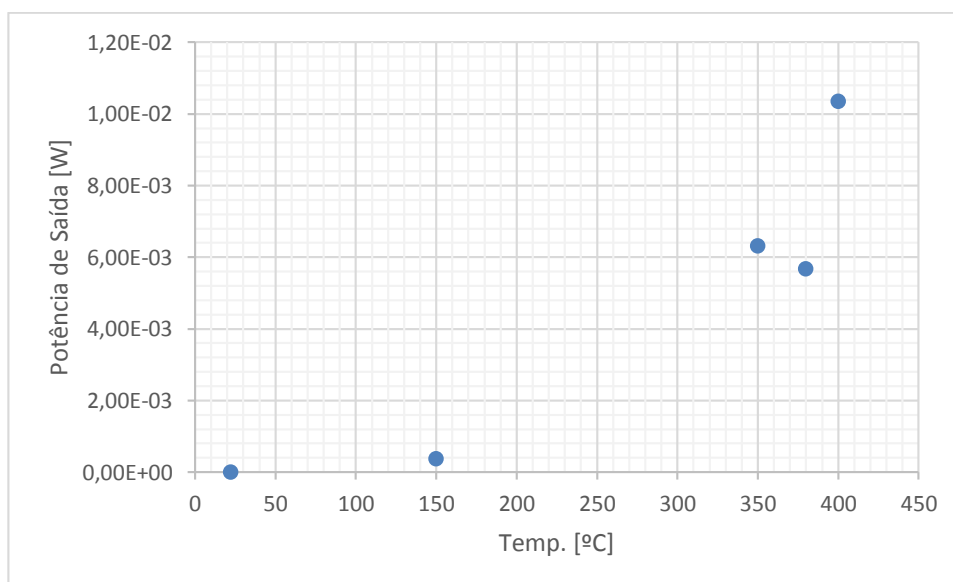


Figura 22 - Influência da temperatura do cilindro quente na potência de saída ao longo do tempo.

Fonte: Autoria própria.

A velocidade máxima registrada para o funcionamento do motor Stirling foi de 1150 rpm, conforme a Figura 23.

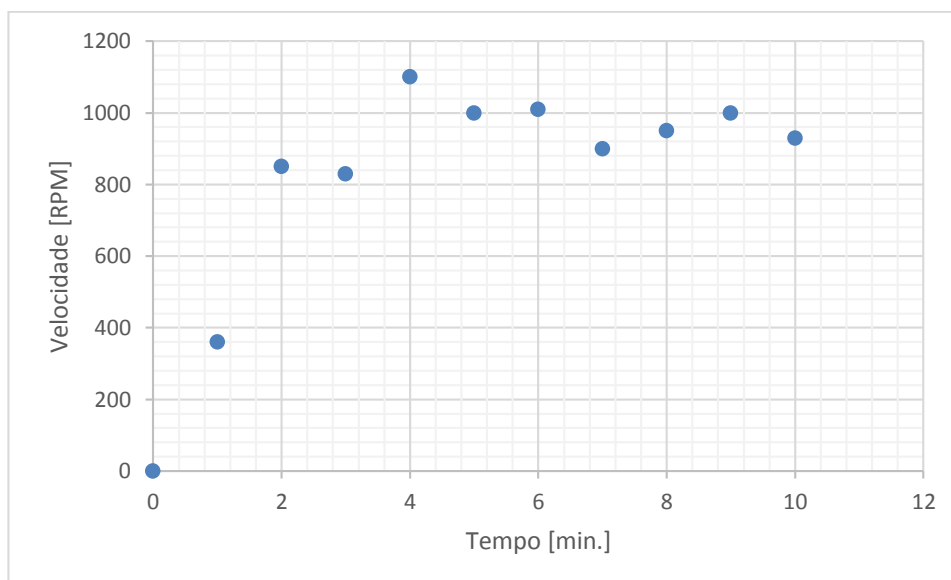


Figura 23 – Curva de velocidade ao longo do tempo do motor Stirling sem carregamento
Fonte: Autoria própria.

Os valores de saída teóricos e obtidos experimentalmente são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais parâmetros de saída com base no teorema de Schimidt

Parâmetros de Saída do motor	Variável Teórica	Variável Experimental	Unidade
Potência do Motor	1,8	0,02	W
Temperatura Da fonte Quente	400	400	°C
Temperatura Da fonte Fria	25	29,3	°C
Diâmetro do Disco de Inércia	70	-	mm
Pressão Máxima do motor	1,54	-	KPa
Trabalho do Motor	0,13	-	J
Eficiência	58	-	%
Velocidade Máx	800	1150	RPM

Fonte: Autoria própria.

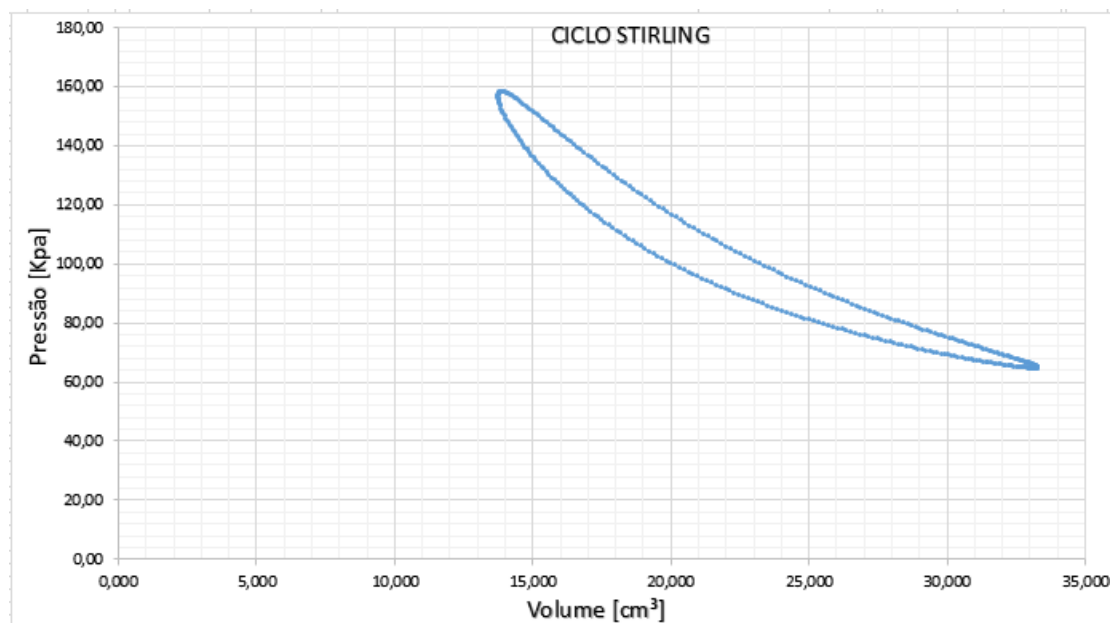


Figura 24 - gráfico teórico obtido segundo a análise de Schmidt
Fonte: Autoria própria.

A temperatura permaneceu constante em 400°C , no entanto percebe-se que no intervalo de 150°C a 350°C não foi possível realizar as medições devido ao rápido aquecimento da câmara quente. Pode-se comprovar, então, que quanto maior o gradiente de temperatura maior será a potência gerada pelo sistema. Comparando com o teorema de Schmidt, temos:

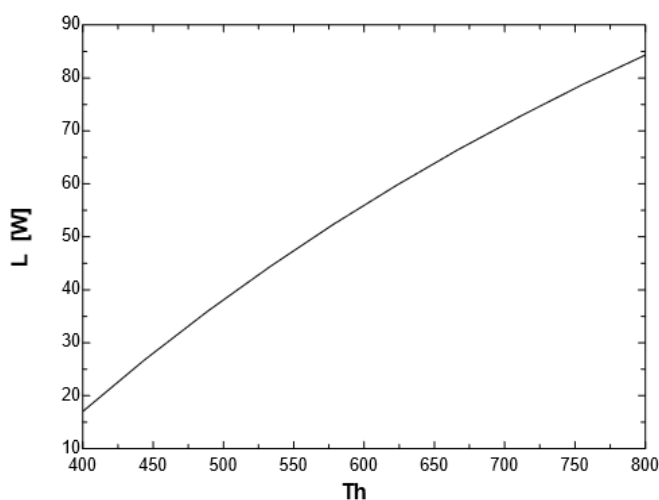


Figura 25 - Influência da temperatura do cilindro quente na potência de saída ao longo do tempo pela análise de schmidt

Fonte: Autoria própria.

Fica evidente o comportamento da curva ao longo do acréscimo de temperatura da fonte quente. O fato de existir volume morto no interior do sistema e também micros vazamentos no pistão de potência pode ter gerado perdas na potência de saída.

A temperatura mais alta alcançada na câmara quente foi 400 ° C, enquanto a temperatura no espaço de refrigeração estava em 29,3 ° C, portanto uma diferença de temperatura entre os dois pistões de 378 ° C. As flutuações na temperatura em torno da segunda marca 400°C são os resultados de reajustes na fonte de calor.

4.3 Influência do ângulo de fase

O ângulo de fase que fornece maior potência é o ângulo de 90°, segundo a análise de Schimidt. Em análises mais complexas, como mostrada no capítulo 2, este ângulo pode variar. A ocorrência desse fenômeno é porque há diferenças entre a temperatura definida pelo modelo ideal e as temperaturas encontradas nos modelos mais complexos que, por considerarem as perdas, apresentam queda na temperatura do fluido. A Figura 26 mostra que o ponto de maior potência se encontra próximo 95° graus para os teste deste motor.

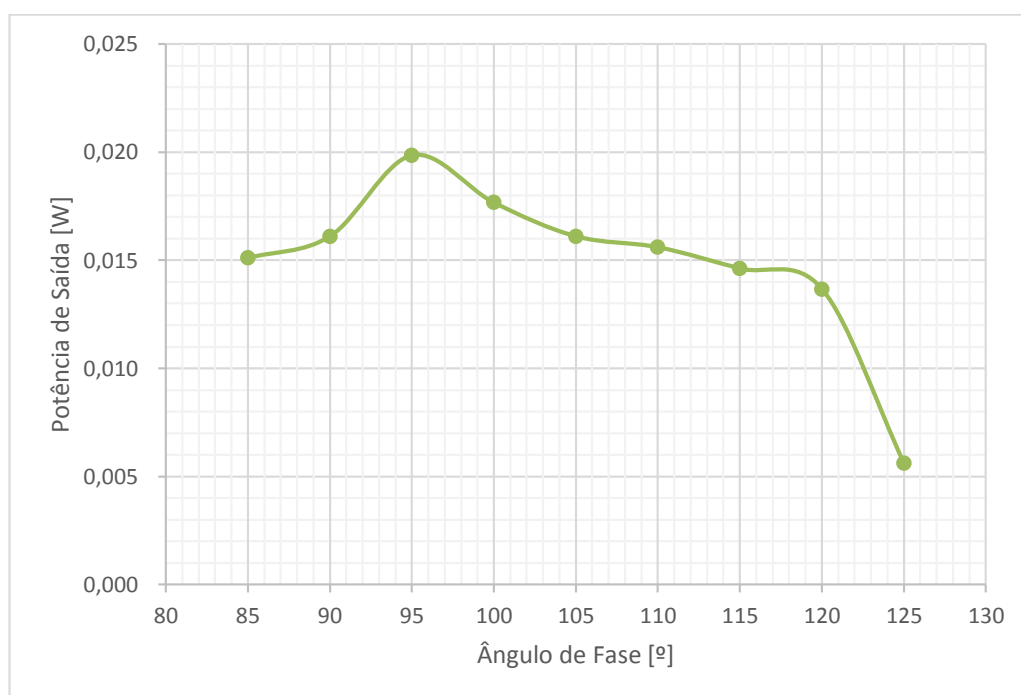


Figura 26. Influência do ângulo de fase no trabalho líquido produzido por ciclo.
Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Nesta seção será concluído o trabalho com base em evidências experimentais. O não funcionamento do modelo tipo alfa, utilizando componentes comerciais, fabricado inicialmente foi o atrito gerado entre os anéis de vedação com a camisa do pistão, por isso partiu-se para a fabricação de um arranjo simples, com peças reduzidas, como é o caso do tipo gama. Quanto ao projeto do motor, ainda é possível afirmar que à construção de um protótipo foi indispensável elaborar um projeto de dimensionamento e seleção dos componentes a serem fabricados. Visualiza-se este trabalho como uma contribuição ao desenvolvimento de motores Stirling, principalmente no que diz respeito ao cenário brasileiro, onde tal tecnologia é raramente estudada.

5.1 Influência da técnica de fabricação

De uma forma geral os processos de usinagem selecionados e as condições de usinagem adotadas foram adequadas para a obtenção de superfícies que atendessem as exigências de projeto. Como resultado foi obtido um motor Stirling didático do tipo gama funcional, de baixo custo e de fácil transporte.

Pistão deslocador - Mancal com vedação

A utilização do bronze grafitado neste projeto demonstrou que a seleção de materiais juntamente com a forma de utilização é de fundamental importância. Apesar de sua capacidade de lubrificação, quando submetido à esforços, rapidamente apresentou desgaste. Sua resistência mecânica não foi suficiente. Ao longo do tempo de uso, este elemento acrescentou uma pequena folga entre a haste do deslocador e o bronze grafitado, ocasionando perda de eficiência energética. Conseqüentemente, os valores de potência de saída foram influenciados, assim como o desbalanceamento rotativo da árvore de transmissão.

Pistão de potência - vedação

O uso de anéis O'ring como elementos de vedação, no pistão de potência, fez com que o protótipo exercesse um excelente trabalho. O alojamento fabricado de forma adequada gera uma vedação satisfatória aliado a um nível de atrito aceitável.

Contudo, recomenda-se cautela, isso porque existem incertezas com relação à sua durabilidade.

Cilindro deslocador

O cilindro deslocador fabricado com liga de alumínio não foi uma boa opção devido à sua alta condutividade térmica, influenciando, portanto, a câmara de resfriamento.

5.2 Resultado da Influência da temperatura do cilindro aquecido na potência de saída

O aumento na temperatura do cilindro aquecido aumentou a potência fornecida pelo motor conforme pode ser observado nas Figura 21 e Figura 22. Isso está de acordo com a teoria de Schimidt. Este teorema implementado neste trabalho, o qual permite prever o desempenho do motor Stirling, e como se desenvolve seu funcionamento, é uma das maiores contribuições deste projeto. Por fim, este protótipo didático registrou uma potência máxima real de 0,02 W e teórica de 1,8 W. Essa diferença se explica devido ao fato de existir grandes perdas, como, por exemplo, devido ao atrito do sistema. Por isso, este projeto não obteve uma potência satisfatória. Também uma velocidade máxima de 1150 rpm foi registrada. Logo, pode-se utilizar maiores temperaturas de trabalho a fim de se atingir maiores potência.

5.3 Influência do ângulo de fase

O ângulo de fase, que é ligeiramente maior do que foi previsto pelo teorema de schimidt, se mostrou máximo em 95° graus. Isso porque existem perdas inerentes ao sistema.

6 SUGESTÕES

Algumas melhorias são possíveis na tentativa sugerir melhorias na eficiência térmica e na potência do motor. Abaixo são listadas algumas melhorias que podem ser realizadas para trabalhos futuros:

- Uma das soluções é utilizar revestimentos de superfície na câmara onde há um maior desgaste e atrito, afim de melhorar as propriedades de vedação e minimizar as perdas devido ao atrito, isso faz com que as perdas energéticas devido ao atrito sejam menores.
- Aplicação de novas análises numéricas, de modo a permitir melhorar a compreensão térmica do sistema.
- Procurar novas formas de vedação para trabalhar com fluídos diferentes do ar
- Diminuir o volume morto que é responsável por uma diminuição de rendimento
- Trocadores de calor eficientes
- Incluir um regenerador para se aumentar a eficiência do motor

REFERÊNCIAS

ANGELINO, GIANFRANCO. **Potential Performance of Real Gas Stirling Cycle Heat Pumps**. 1996. 10 f. Energy Department, Politecnico di Milano. Milano, Italy.

BARROS, R. W. (2005), **Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis**. Itajubá, 143p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

BRILL, ANNA. **Optimization of Stirling Engine Power Output Through Variation of Choke Point Diameter and Expansion Space Volume**. 2012 17 f. Massachusetts: Academy of Math and Science.

HIRATA, K. **Schmidt Theory for Stirling Engines**. Stirling Engine home page. Disponível em: <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/> Acesso em 18 abr. 2015;

HOOPER, C., READER, G. T. **Stirling Engines**. Cambridge: University Press (1983).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Síntese de Indicadores Sociais Uma análise das Condições de Vida**: Da população brasileira. Mar. 2012. 293 p. Disponível em <ftp://ftp.ibge.gov.br/Indicadores_Sociais/Sintese_de_Indicadores_Sociais_2012/SIS_2012.pdf>. Acesso em: 12 Maio 2015>.

International Energy Agency IEA – <http://www.iea.org>, site consultado em 20/05/2015;

LACRUZ, Caio Cesar Cabreira. **Modelagem Computacional e Estudo Paramétrico de um Motor Stirling**. 2012. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –

Curso Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

LUIZ, Guilherme Breda Duarte; MARCELO, Toledo; THIAGO, wesley de oliveira. **Conversão De Energia Térmica Em Energia Elétrica Utilizando Motor Stirling**. 2013. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Tecnologia em Mecatrônica Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

National Aeronautics and Space Administration NASA - site consultado em 23/05/2015; <https://tec.grc.nasa.gov/rps/advanced-stirling-converter/>

PAULA, R. B. (2007), **Projeto e avaliação teórica e experimental de sistemas de geração de eletricidade a partir da biomassa utilizando motores Stirling**. 178 pg. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007

RODGAKIS, E. D., N. A. BORBILAS, E. A. PARADISSIS and A.P. NIKOLAIDIS (2002). **A MathCAD program (AMOCO) as a simple tool for the study of the Stirling engines**. 6th European Stirling Forum, Osnabrück, Germany, September 18-19, 2002.

SANDFORT, J. F. (1962) Heat Engines. New York. **Anchor Books Doubleday & Company, INC.**

SANT'ANNA, Bruno H. de; YANO, Diogo H. S. **Projeto e simulação de um motor Stirling**. 2012. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

THOMBARE, D. G.; VERMA, S. K. **Technological development in the Stirling cycle engines**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 12, p. 1-38, Jan. 2008.

URIELI, Israel. **A computer simulation of Stirling cycle machines**. 1977. 282 f. Tese (PhD. em engenharia). University of the Witwatersrand, Joanesburgo, 1977.

WALKER, Graham. **Stirling Engines**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1980.

APÊNDICE A: – EQUAÇÕES DE SCHMIDT APLICADAS AOS ARRANJOS CONSTRUTIVOS DOS MOTORES STIRLING

Neste apêndice estão apresentadas todas as equações referentes ao protótipo construído para a simulação de motores Stirling. É importante observar que esta seção está dividida de acordo com o arranjo físico do motor apresentado na Figura 4. As condições de contorno na análise da pressão do motor são:

- a) Não há perda de calor durante o ciclo, também não há diferença interna de pressão;
- b) São isotérmicos os processos de expansão e de compressão;
- c) Considera-se ideal o fluido de trabalho;
- d) O regenerador é ideal, ou seja, não há perdas de calor quando este existir;
- e) Os volumes mortos de expansão e de compressão mantêm as temperaturas T_e e T_c , respectivamente, constantes durante o ciclo;
- f) A temperatura do gás no regenerador é uma média da temperatura do gás na expansão T_e e na compressão T_c ;
- g) Os volumes de compressão e expansão comportam-se como uma função senoidal.

APÊNDICE A1: MOTOR STIRLING TIPO ALFA

A Figura 27 - Arranjo físico do motor Stirling tipo alfa apresenta o arranjo didático mostrando as principais variáveis de um modelo de cálculo do motor Stirling tipo alfa.

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (4)$$

Pelas condições de contorno (a), (b) e (c), a massa total no motor m é calculada usando a pressão do motor P , cada temperatura T , cada volume V e a constante dos gases ideais, R .

$$m = \frac{PV_R}{RT_C} + \frac{PV_C}{RT_C} + \frac{PV_E}{RT_E} \quad (4)$$

A Temperatura relativa t , o volume percorrido relativo v e os volumes mortos relativos são encontrados manipulando-se as seguintes equações:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (6)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (7)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (8)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (9)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (10)$$

A temperatura do regenerador TR é calculada pela equação 11, e pela condição de contorno (f).

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (11)$$

Portanto, a massa total do gás é definida como:

$$m = \frac{P}{RT_C} (tV_E + \frac{2tV_R}{1+t} + V_C) \quad (12)$$

Empregando as equações 2 e 3 em 13, tem-se:

$$m = \frac{PV_{SE}}{2RT_C} [S - B \cos(x - a)] \quad (13)$$

Logo, os coeficientes da análise de Schmidt são:

$$a = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{v \operatorname{sen}(dx)}{t + \operatorname{cos}(dx)} \right] \quad (14)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (15)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \operatorname{cos}(dx) + v^2} \quad (16)$$

Define-se a pressão do motor como sendo um rearranjo da equação 14:

$$P = \frac{2mRT_C}{V_{SE}[S - B \cos(x - a)]} \quad (17)$$

A pressão média é definida:

$$P_{med} = \frac{1}{2\pi} \oint P dx = \frac{2mRT_c}{V_{SE}\sqrt{S^2 - B^2}} \quad (18)$$

Onde c é definido como:

$$c = \frac{B}{S} \quad (19)$$

Modificando as equações 18 e 19, fica:

$$P = \frac{P_{med}\sqrt{S^2 - B^2}}{S - B\cos(x - a)} = \frac{P_{med}\sqrt{1 - C^2}}{1 - c \cos(x - a)} \quad (20)$$

A pressão mínima é, portanto:

$$P_{min} = \lim_{\cos(x-a) \rightarrow -1} \frac{P_{med}\sqrt{S^2 - B^2}}{S - B\cos(x - a)} = \frac{2mRT_c}{V_{SE}(S + B)} \quad (21)$$

Analogamente para o caso em que a pressão do motor torna-se máxima, obtém-se:

$$P_{máx} = \lim_{\cos(x-a) \rightarrow +1} \frac{P_{med}\sqrt{S^2 - B^2}}{S - B \cos(x - a)} = \frac{2mRT_c}{V_{SE}(S - B)} \quad (22)$$

Com base nas equações acima descritas podemos, enfim, construir o gráfico pressão - volume.

APÊNDICE A2: MOTOR STIRLING TIPO BETA

De maneira análoga à feita na análise do motor tipo alfa podemos fazer para o motor tipo beta. A figura a seguir mostra o arranjo das principais variáveis do motor Stirling tipo beta.

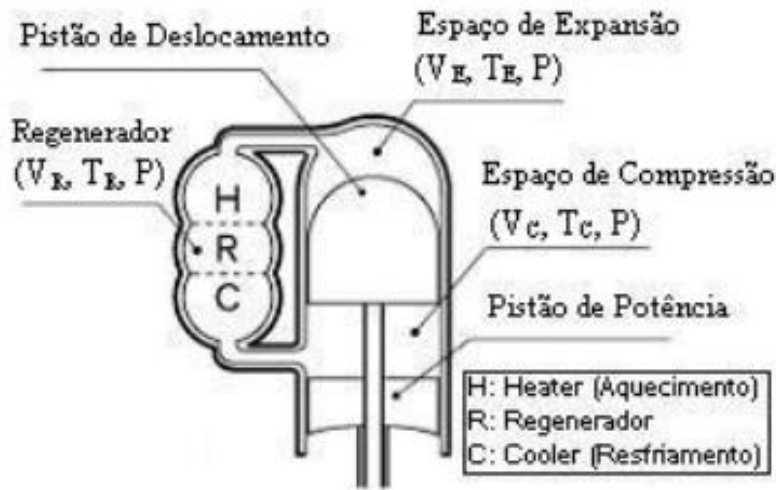


Figura 28 - Arranjo esquemático com as principais variáveis do motor Stirling tipo beta
 FONTE: Adaptado (HIRATA, 1995)

Nas equações seguintes estão descritos o volume instantâneo de expansão V_E , o volume instantâneo de compressão V_C , o volume percorrido pelo pistão de deslocamento V_{SE} , o volume percorrido pelo pistão de potência V_{SC} e um ângulo entre o pistão de deslocamento e o pistão de potência dx .

$$V_E = \frac{V_{SE}(1 - \cos x)}{2} + V_{DE} \quad (23)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}(1 - \cos x)}{2} + \frac{V_{SC}[1 - \cos(x - dx)]}{2} + V_{DC} - V_B \quad (24)$$

Conforme pode ser visualizado na Figura 28 - Arranjo esquemático com as principais variáveis do motor Stirling tipo beta, percebe-se que os pistões de deslocamento e de potência estão na mesma câmara. Portanto, quando os pistões sobrepõem seus cursos um espaço de trabalho efetivo é gerado, logo o volume sobreposto V_B é definido como:

$$V_B = \frac{V_{SE} + V_{SC}}{2} - \sqrt{\frac{V_{SE}^2 + V_{SC}^2}{4} - \frac{V_{SE} V_{SC}}{2} \cos(dx)} \quad (25)$$

É calculado o volume total instantâneo V pela seguinte equação:

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (26)$$

Para pressão do motor Stirling tipo beta, temos:

$$P = \frac{P_{med} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 - c)}{1 - c \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 + c)}{1 - c \cos(x - a)} \quad (27)$$

Os coeficientes e as equações manipuladas na análise do motor Stirling tipo beta são:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (28)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (29)$$

$$X_B = \frac{V_B}{V_{SE}} \quad (30)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (31)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (32)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (33)$$

$$a = tg^{-1}\left(\frac{v \operatorname{sen}(dx)}{t + \cos(dx) + 1}\right) \quad (34)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 - 2X_B \quad (35)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (36)$$

Com estas equações acima chega-se a construção do diagrama P-V.

APÊNDICE A3: MOTOR STIRLING TIPO GAMA

Por fim, de maneira semelhante feita em ambos os casos anteriores, podemos, portanto, analisar o motor tipo gama. A figura a seguir mostra o arranjo das principais variáveis do motor Stirling tipo gama.

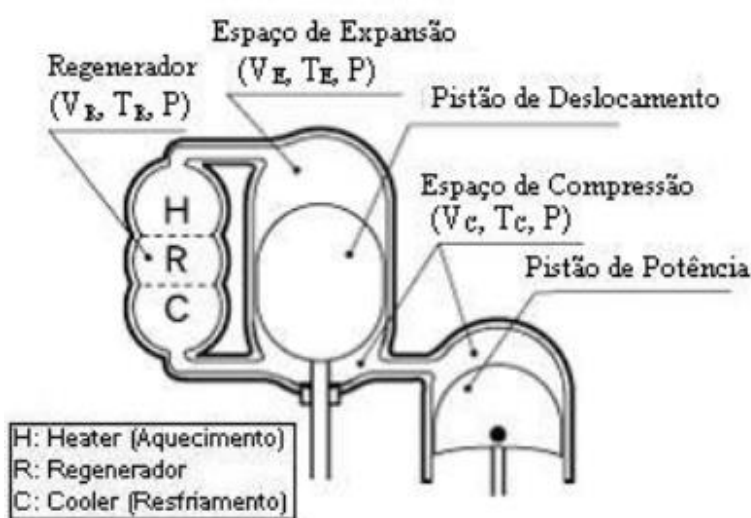


Figura 29 - Arranjo esquemático com as principais variáveis do motor Stirling tipo gama
FONTE: Adaptado (HIRATA, 1995)

As equações seguintes descrevem de maneira semelhante ao dois casos anteriores no qual estão descritos o volume instantâneo de expansão V_E , o volume instantâneo de compressão V_C , o volume percorrido pelo pistão de deslocamento V_{SE} , o volume percorrido pelo pistão de potência V_{SC} e um ângulo entre o pistão de deslocamento e o pistão de potência dx .

$$V_E = \frac{V_{SE}(1 - \cos x)}{2} + V_{DE} \quad (37)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}(1 - \cos x)}{2} + \frac{V_{SC}[1 - \cos(x - dx)]}{2} + V_{DC} \quad (38)$$

É calculado o volume total instantâneo V pela seguinte equação:

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (39)$$

Para a pressão do motor Stirling tipo gama, temos:

$$P = \frac{P_{med}\sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 - c)}{1 - c \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 + c)}{1 - c \cos(x - a)} \quad (40)$$

Os coeficientes e as equações usadas na análise do motor Stirling tipo gama são:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (41)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (42)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (43)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (44)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (45)$$

$$a = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{v \operatorname{sen}(dx)}{t + \cos(dx) + 1}\right) \quad (46)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 \quad (47)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (48)$$

Com estas equações acima chega-se à construção do diagrama P-V.

6.1.1 Eficiência, Potência Indicada e Energia

Através dos coeficientes da análise de Schmidt é possível calcular o trabalho fornecido para o motor de forma analítica ou através da integração da área do diagrama P-V. As equações a seguir mostram a energia indicada na expansão E_e baseada na pressão média P_{med} , na pressão mínima P_{min} e na pressão máxima $P_{máx}$.

$$E_e = \oint PdV_E = \frac{P_{med}V_{SE}\pi c \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min}V_{SE}\pi c \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = \frac{P_{m\acute{a}x}V_{SE}\pi c \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (49)$$

A energia de compressão E_c é descrita a seguir:

$$E_c = \oint PdV_C = -\frac{P_{med}V_{SE}\pi c t \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = -\frac{P_{min}V_{SE}\pi c t \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = -\frac{P_{m\acute{a}x}V_{SE}\pi c t \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (50)$$

A energia do ciclo do motor E_i , fica:

$$E_i = E_c + E_e = \frac{P_{med}V_{SE}\pi c(1 - t)\operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min}V_{SE}\pi c(1 - t)\operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = -\frac{P_{m\acute{a}x}V_{SE}\pi c(1 - t)\operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (51)$$

As relações entre as pressões P_{med} , P_{min} e P_{max} são representadas pelas equações a seguir:

$$\frac{P_{min}}{P_{med}} = \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (52)$$

$$\frac{P_{max}}{P_{med}} = \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad (53)$$

As potências de expansão, de compressão e do motor são definidas em relação a rotação n (Hz) e a Energia E (J).

$$W_E = nE_E \quad (54)$$

$$W_C = nE_C \quad (55)$$

$$W_i = nE_i \quad (56)$$

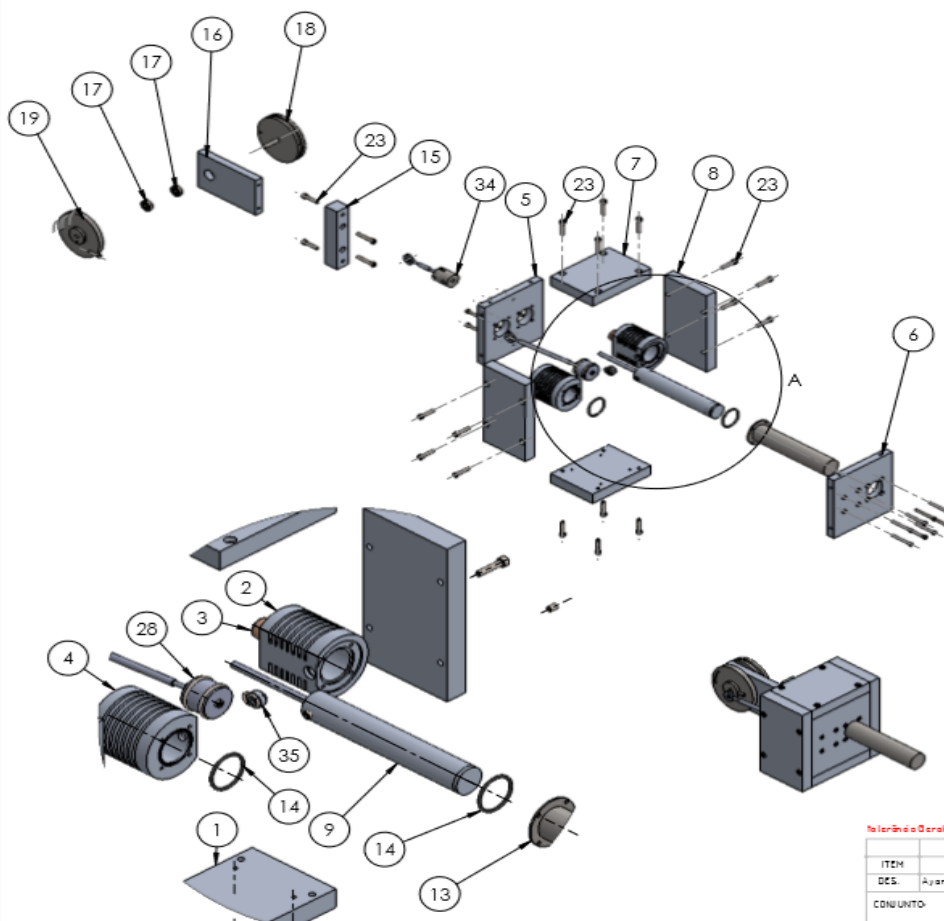
As *energias* E_e e E_c são energias de expansão e de compressão, respectivamente. Logo pode-se chegar à equação da eficiência, que é definida como:

$$n_t = \frac{E_i}{E_E} = 1 - t \quad (57)$$

Esta eficiência é analogamente igual a eficiência do ciclo de Carnot. Portanto, pode-se dizer que é a máxima eficiência teórica para um ciclo termodinâmico.

APÊNDICE B: PROJETO DE FABRICAÇÃO DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA

APÊNDICE B1: VISTA EXPLODIDA DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.
1	Base Inferior de Sustentação	1
2	Cilindro de Deslocamento	1
3	Bucha da Haste de Deslocamento	1
4	Cilindro de Potência	1
5	Base Superior de Transmissão	1
6	Base Superior de Aquecimento	1
7	Base Superior de Sustentação	1
8	Fechamento Lateral	2
9	Deslocador Principal	1
10	Tampa do Deslocador	1
11	DIN 913 - M6 x 6-N	2
12	Haste do Conjunto de Deslocamento	1
13	Tubo de Aquecimento	1
14	Anel O'ring Dia. 27	2
15	Base de Transmissão Inferior	1
16	Base de Transmissão Principal	1
17	SKF - 625 - 8,SI,NC,8_68	2
18	Volante de transmissão de Deslocamento	1
19	Volante de transmissão de Potência	1
20	ISO 4762 M3 x 16 --- 16N	1
21	ISO 4762 M4 x 25 --- 25N	2
22	ISO 4762 M3 x 30 --- 18N	16
23	ISO 4762 M4 x 20 --- 20N	18
24	Haste de Potência	1
25	Articulação de Transmissão	2
26	ISO 15 RBB - 273 - 12,SI,NC,12_68	4
27	Articulador do Pistão de Potência	1
28	Pistão de Potência	1
29	ISO 4762 M3 x 10 --- 10N	1
30	O-ring 3.15x1.8-A-ISO 3601-1	1
31	O-ring 21.2x2.65-A-ISO 3601-1	2
32	Haste de Deslocamento.SLDASM	1
33	Articulação de Deslocamento.SLDASM	2
34	Articulador do Pistão de Deslocamento.SLDASM	1
35	Conector das Câmaras	1
36	O-ring 7.1x1.8-A-ISO 3601-1	3

tolerância Geral $\pm 0.2\text{mm}$

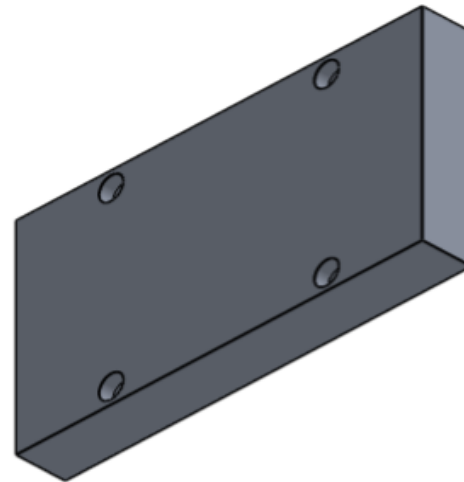
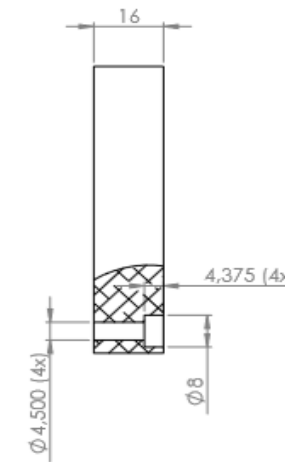
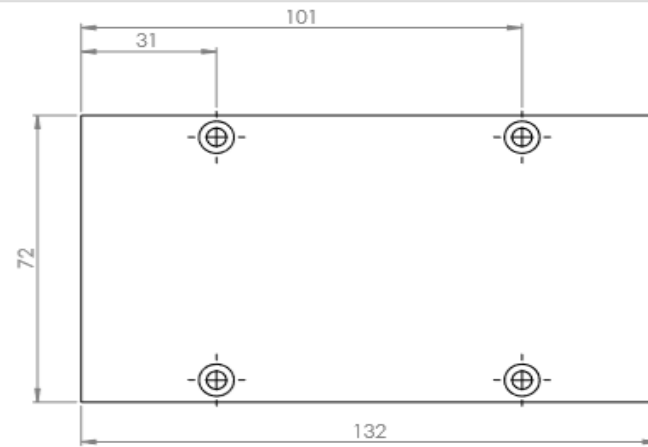
ITEM	DTDE	TRATAMENTO	MATERIAL	ESCALA
1			SW-Material@PeçasLDPRT	
DCS	Ayan Martins	DATA:15/11/2015	FORMATO: A3	
CONJUNTO				
PARTE: Motor Stirling Tipo Gama				

UNIDADE: SW-Material@PeçasLDPRT

REVISÃO 0

DETALHE A
ESCALA 2 : 5

APÊNDICE B2: VISTA DETALHADA DO FECHAMENTO LATERAL



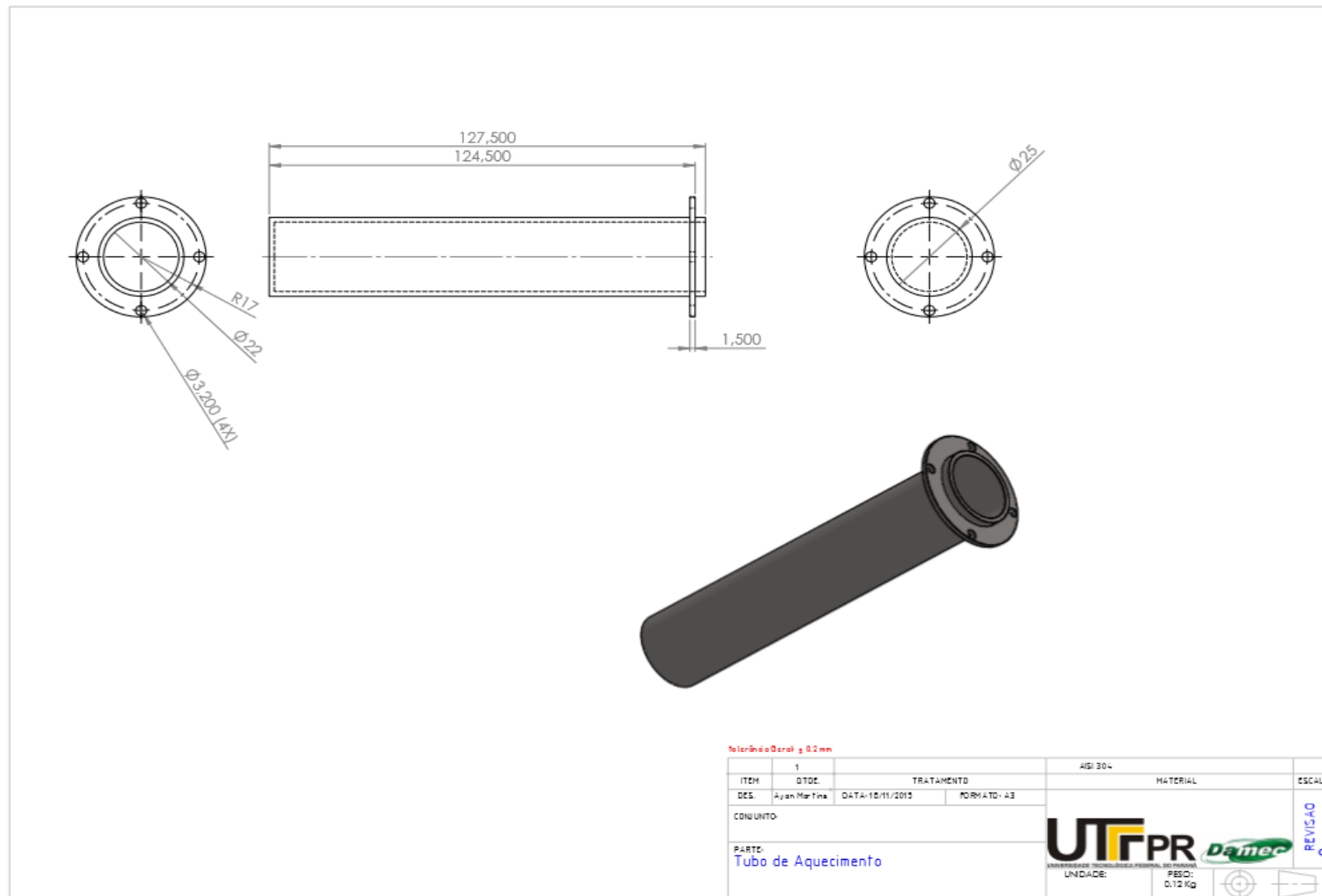
Tolerância Geral ± 0,2 mm

ITEM	QTD.	TRATAMENTO	2014-10	MATERIAL	ESCALA
DES.	Ayan Martins	DATA: 10/11/2013	PROJETO: A3		
CONJUNTO:					
PARTE: Fechamento Lateral					
UNIDADE:				0,42 Kg	REVISÃO
					0

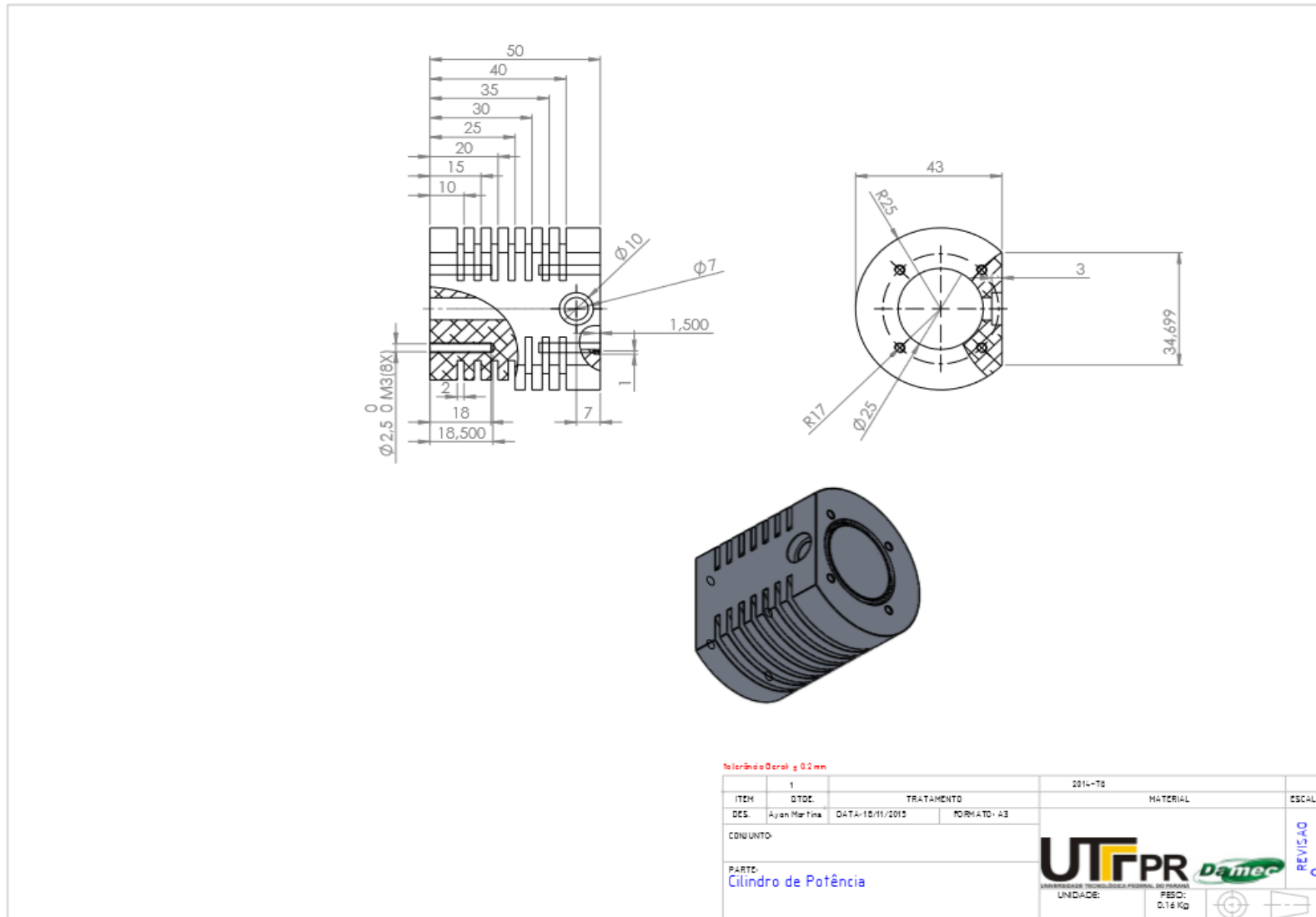
UTFPR **DAMEC**
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ



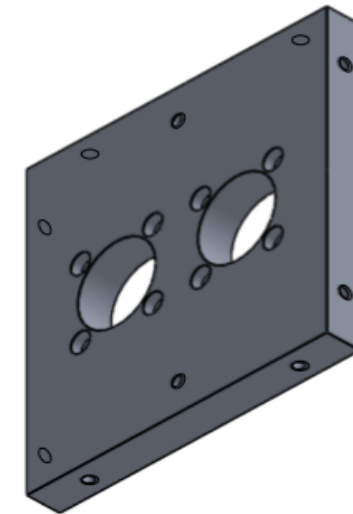
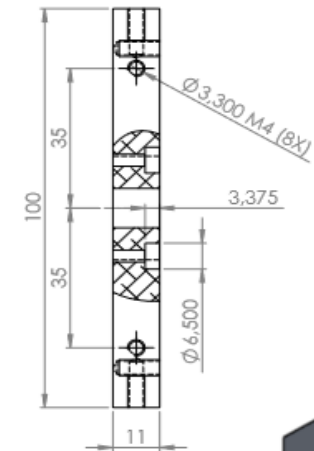
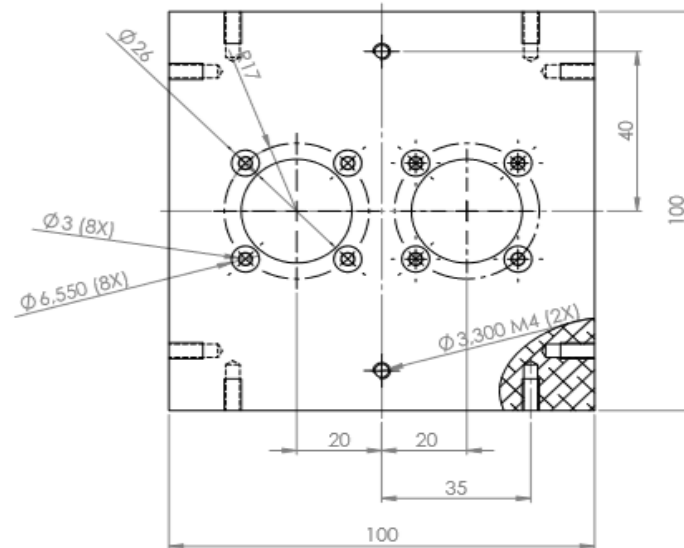
APÊNDICE B3: CILINDRO DE AQUECIMENTO



APÊNDICE B4: CILINDRO DE POTÊNCIA

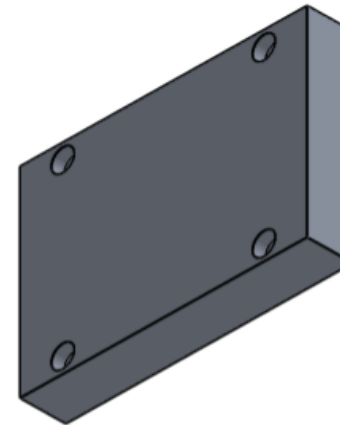
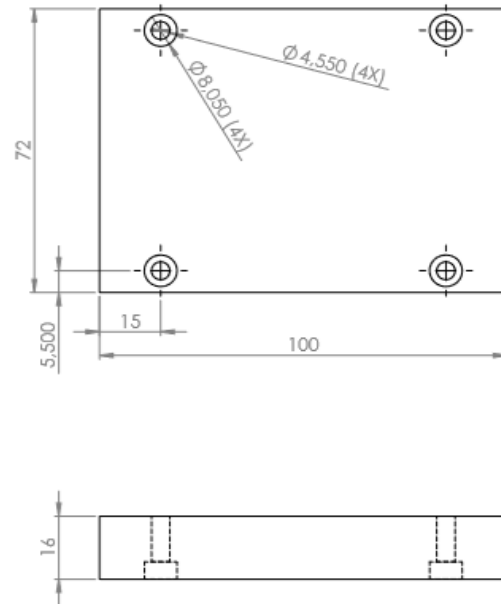


APÊNDICE B5: BASE SUPORTE DE TRANSMISSÃO

Tolerância Geral ± 0.2 mm

ITEM	QTD.	TRATAMENTO	2014-76	MATERIAL	ESCALA
1					
DES.	Ayan Mar Fina	DATA: 10/11/2015	FORMATO: A3		
CONJUNTO:					
PARTE: Base Superior de Transmissão					
					REVISÃO
			UNIDADE:	0.27 Kg	0

APÊNDICE B6: BASE SUPERIOR DE SUSTENTAÇÃO



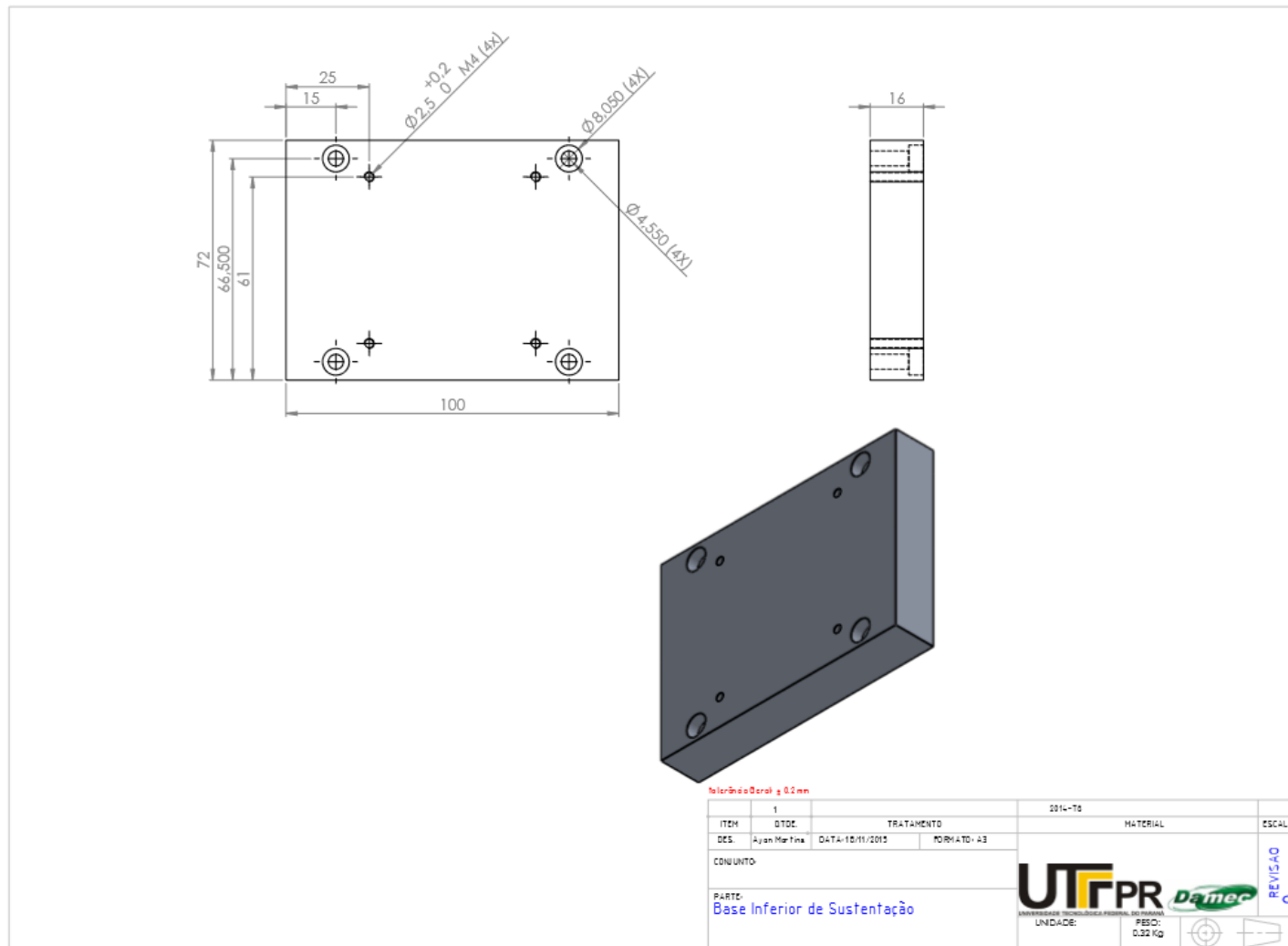
tolerância geral $\pm 0,2$ mm

ITEM	1	TRATAMENTO		2014-T0	MATERIAL	ESCALA
DES.	Ayan Martins	DATA: 10/11/2015	FORMATO: A3			
CONJUNTO:						
PARTES:	Base Superior de Sustentação					
UNIDADE:	PESO:		0,32 Kg			
						REVISÃO 0

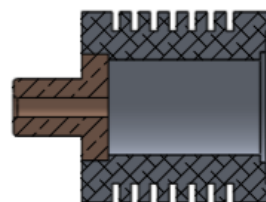
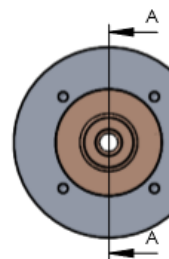
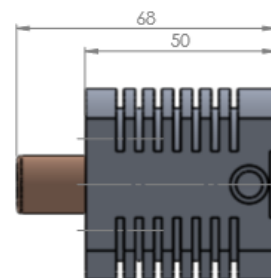
UTFPR **DAMEC**
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ



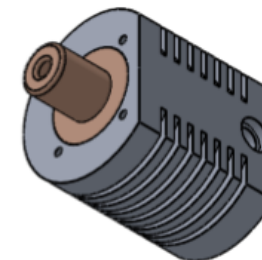
APÊNDICE B8: BASE INFERIOR DE SUSTENTAÇÃO



APÊNDICE B9: MONTAGEM CÂMARA DE DESLOCAMENTO



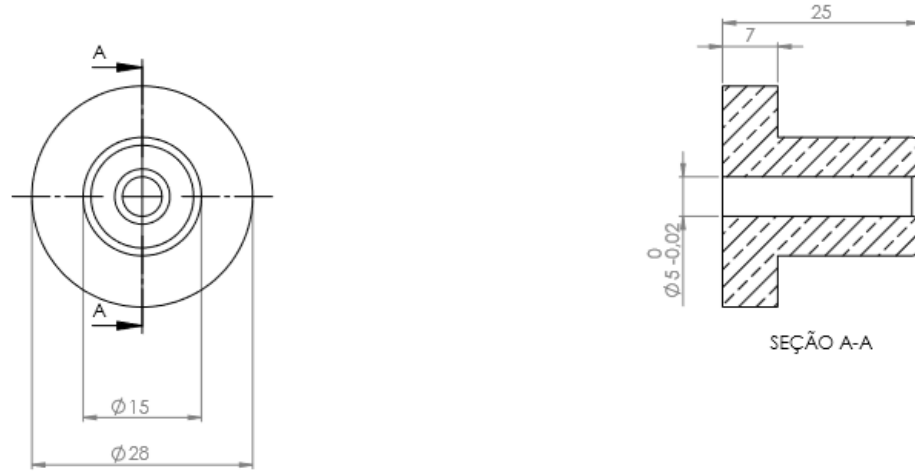
SEÇÃO A-A



Tolerância Geral: $\pm 0,2\text{ mm}$

ITEM	QTD.	TRATAMENTO	S/W-Material@PeçasLDPRT	MATERIAL	ESCALA
1					
DES.	Aujan Martins	DATA: 10/11/2012	FORMATO: A3		
CONJUNTO:					
PARTE: Montagem Câmara de Deslocamento					
				REVISÃO 0	
UNIDADE:					

APÊNDICE B11: BUCHA DA HASTE DE DESLOCAMENTO



Tolerância Geral $\pm 0,2$ mm

ITEM	QTD.	TRATAMENTO	Material	ESCALA
1			Branco geral al. UNS C62000 (Branco 90-10)	
DES.	Ajan Martins	DATA: 10/11/2015	FORMATO: A3	
CONJUNTO				
PARTE: Bucha da Haste de Deslocamento				
			UTPR UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ UNIDADE:	Damec PESO: 0,06 Kg
				REVISÃO 0

APÊNDICE B12 : MONTAGEM HASTE DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	Material	Espécie	QTD.
1	ISO 15 RBB - 273 - 12.SI.NC.12_68		Comprado	2
2	Articulação de Transmissão	Material <não especificado>	Fabricado	2
3	Haste de Potência	Material <não especificado>	Fabricado	1
4	O-ring 21.2x2.65-A-ISO 3601-1		Comprado	2
5	Articulador do Pistão de Potência	Material <não especificado>	Fabricado	1
6	Pistão de Potência	Material <não especificado>	Fabricado	1
7	O-ring 3.15x1.8-A-ISO 3601-1		Comprado	1
8	ISO 4762 M3 x 10 --- 10N		Comprado	2

tolerância total $\pm 0,2$ mm

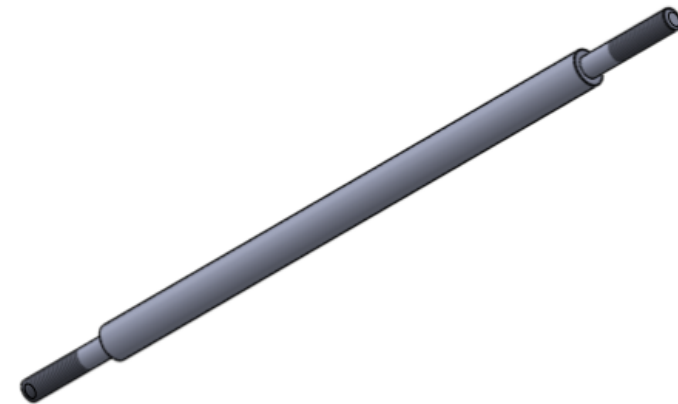
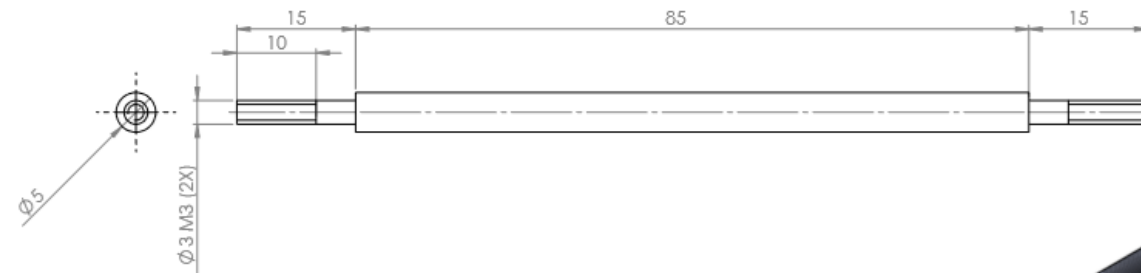
ITEM	QTD.	TRATAMENTO	S.V-Material@PeçasLDRPT	MATERIAL	ESCALA
1					
DES.	Ayan Mar Fina	DATA: 10/11/2015	FORMATO: A3		
CONJUNTO:					
PARTE: Montagem Haste de transmissão de Potência					

UNIDADE: PESO: SW-Mass@PeçasLDRPT

UTPR DAMEC

REVISÃO

APÊNDICE B13 : HASTE DE POTÊNCIA



Tolerância Geral $\pm 0,2\text{mm}$

ITEM	QTD.	TRATAMENTO	MATERIAL	ESCALA
1			Material em bloco fixado	
DES.	Ayan Mar Fina	DATA: 10/11/2015	FORNATO: A3	
CONJUNTO:				
PARTE:				
Haste de Potência				
UNIDADE:			QTD:	
			0,00 Kg	
				REVISÃO
				0

UTFPR **Damec**

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

UNIDADE:

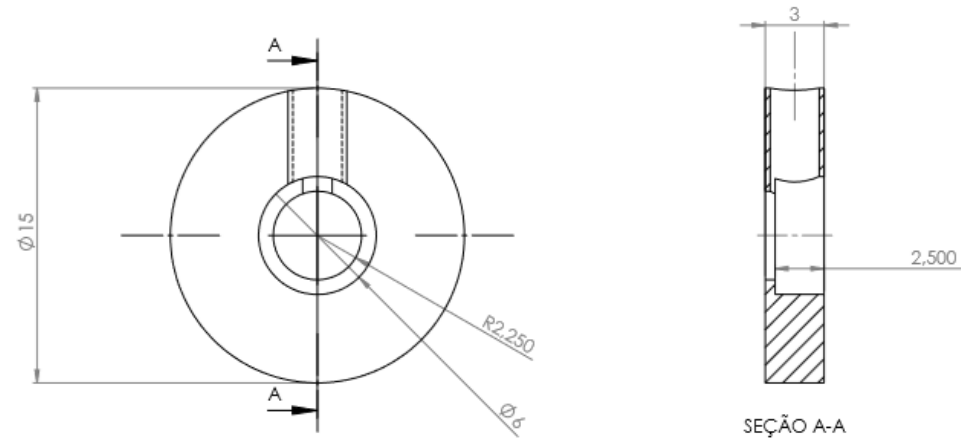
QTD:

0,00 Kg

REVISÃO

0

APÊNDICE B14 : ARTICULAÇÃO DE DESLOCAMENTO



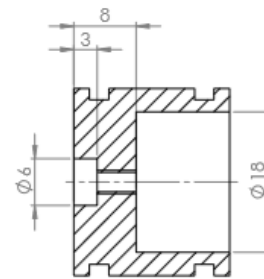
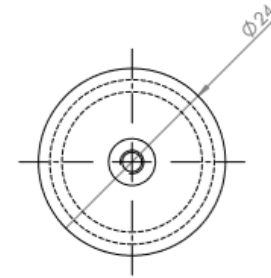
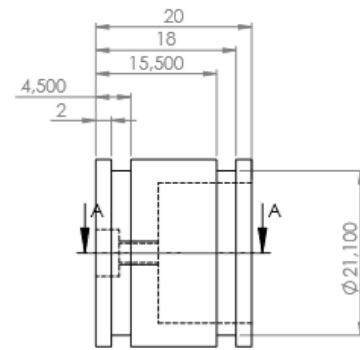
Tolerância Geral $\pm 0,2$ mm

ITEM	Q.TDE.	TRATAMENTO	MATERIAL	ESCALA
1			Material não especificado	
DES.	Ayan Marina	DATA: 10/11/2015	FORMATO: A3	
CONJUNTO:				
PARTE: Articulação de Deslocamento.SLDASM				
UNIDADE:			RESQ: 0,00 Kg	REVISÃO 0

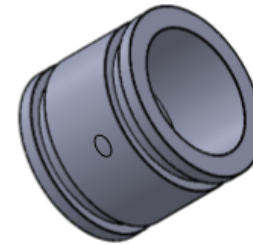
UTPR **Damec**
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ



APÊNDICE B15 : PISTÃO DE POTÊNCIA



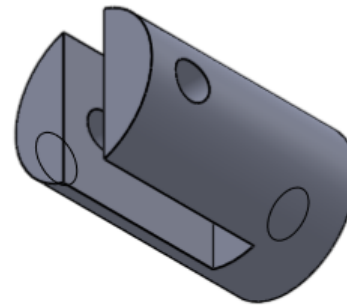
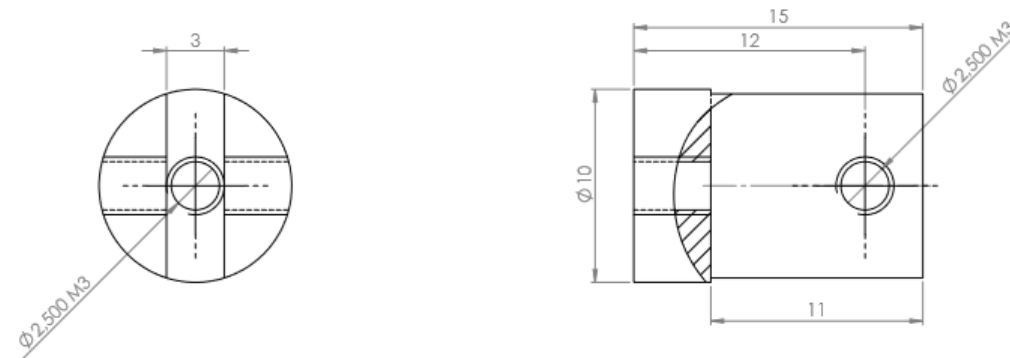
SEÇÃO A-A



Tolerância Geral: $\pm 0,2$ mm

ITEM	QTD	TRATAMENTO	MATERIAL	ESCALA
1			Material «não especificado»	
DES.	Ayan Martins	DATA: 10/11/2010	NORMA: A3	
CONJUNTO:				
PARTE: Pistão de Potência				
				REVISÃO
			UNIDADE:	PESO: 0,01 KG

APÊNDICE B16 : ARTICULADOR DO PISTÃO DE POTÊNCIA

Tolerância Geral $\pm 0,2\text{mm}$

1		Material não especificado			
ITEM	DTDE.	TRATAMENTO		MATERIAL	ESCALA
DES.	Ayan Marina	DATA: 10/11/2015	FORN: A3		
CONJUNTO:					
PARTE:					
Articulador do Pistão de Potência					
UNIDADE:				PESO:	
				0,00 Kg	
					REVISÃO
					0

UTFPR **Damec**

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ



APÊNDICE B17 : MONTAGEM HASTE DE TRANSMISSÃO DE DESLOCAMENTO

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	Material	Espécie	QTD.
1	Haste de Deslocamento.SLDASM	Material <não especificado>	Fabricado	1
2	Articulação de Deslocamento.SLDASM	Material <não especificado>	Fabricado	2
3	ISO 15 RBB - 273 - 12.SI,NC,12_68		Comprado	2
4	Articulador do Pistão de Deslocamento.SLDASM	AISI 1020	Fabricado	1
5	ISO 4762 M3 x 12 --- 12N		Comprado	1
6	ISO 4762 M3 x 16 --- 16N		Comprado	1
7	ISO 4029 - M6 x 5-N		Comprado	1

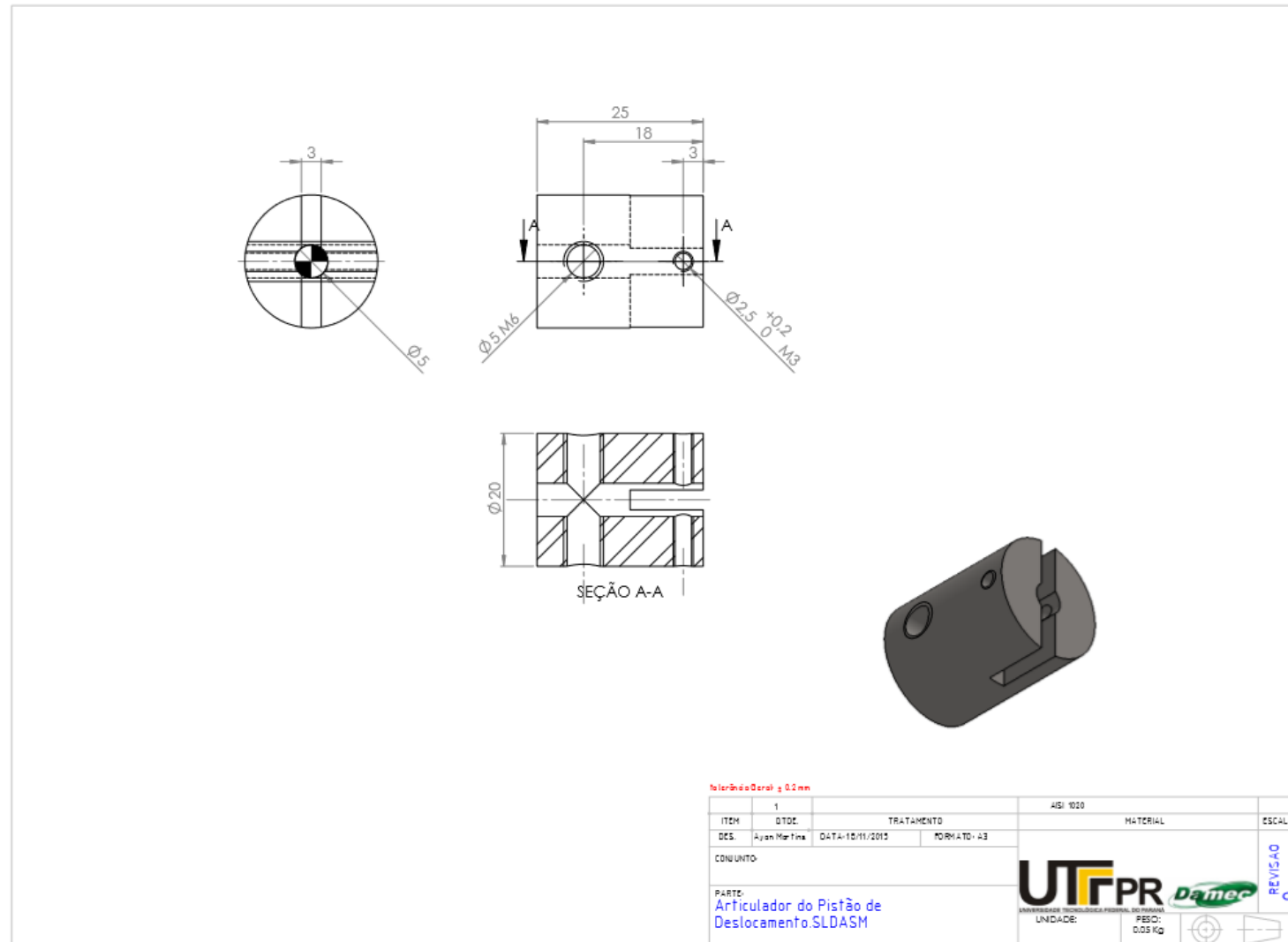
tolerância 0,02 mm

ITEM	1	TRATAMENTO	SW-Material@PeçaSLDPRP	ESCALA
DES.	Ayan Martins	DATA: 10/11/2015	NORMA TO: A3	
CONJUNTO				
PART:	Montagem Haste de transmissão de Deslocamento			

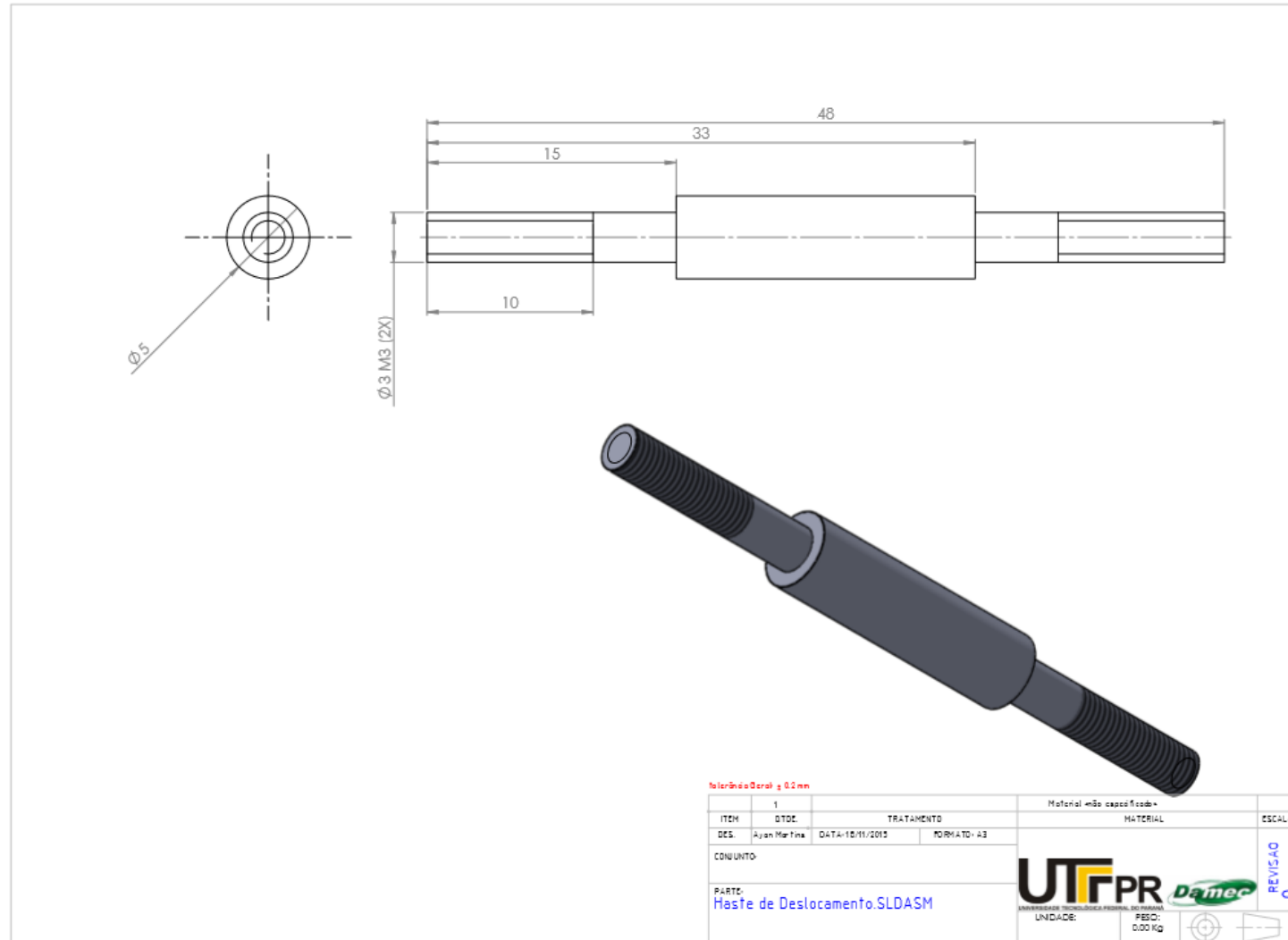
UNIDADE: PESO: SW-Moss&P&

UTPR **Damec** REVISÃO 0

APÊNDICE B18 : ARTICULADOR DO PISTÃO DE DESLOCAMENTO



APÊNDICE B19 :HASTE DE DESLOCAMENTO



APÊNDICE B20 : MONTAGEM SISTEMA DE TRANSMISSÃO

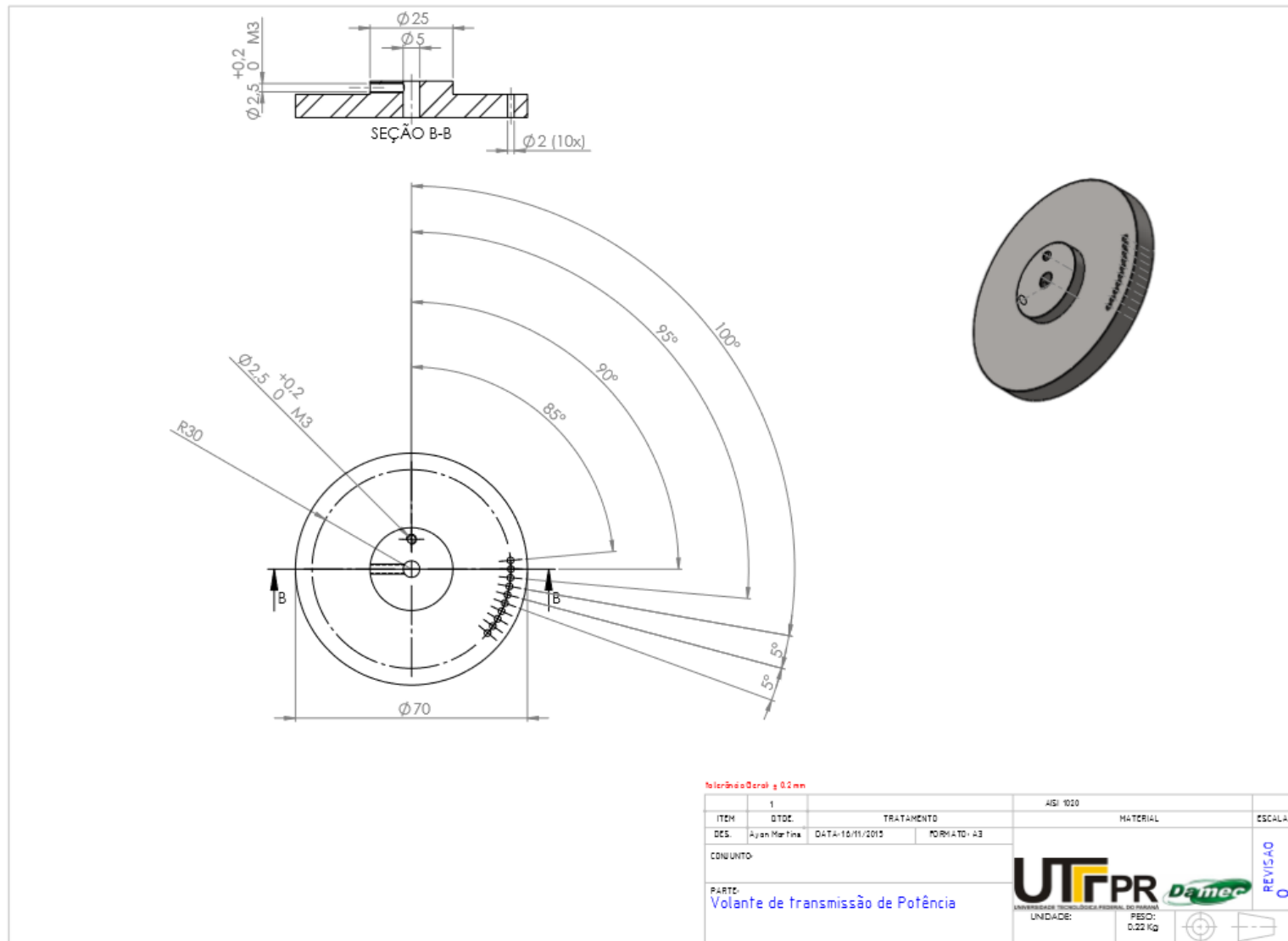
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	Material	Espécie	QTD.
1	Volante de transmissão de Deslocamento	AISI 1020	Fabricado	1
2	Base de Transmissão Principal	2014-T6	Fabricado	1
3	SKF - 625 - 8,SI,NC,8_68		Comprado	2
4	Volante de transmissão de Potência	AISI 1020	Fabricado	1
5	ISO 4762 M3 x 16 --- 16N		Comprado	1
6	Base de Transmissão Inferior	2014-T6	Fabricado	1
7	ISO 4762 M4 x 25 --- 25N		Comprado	2

Montagem Sistema de transmissão

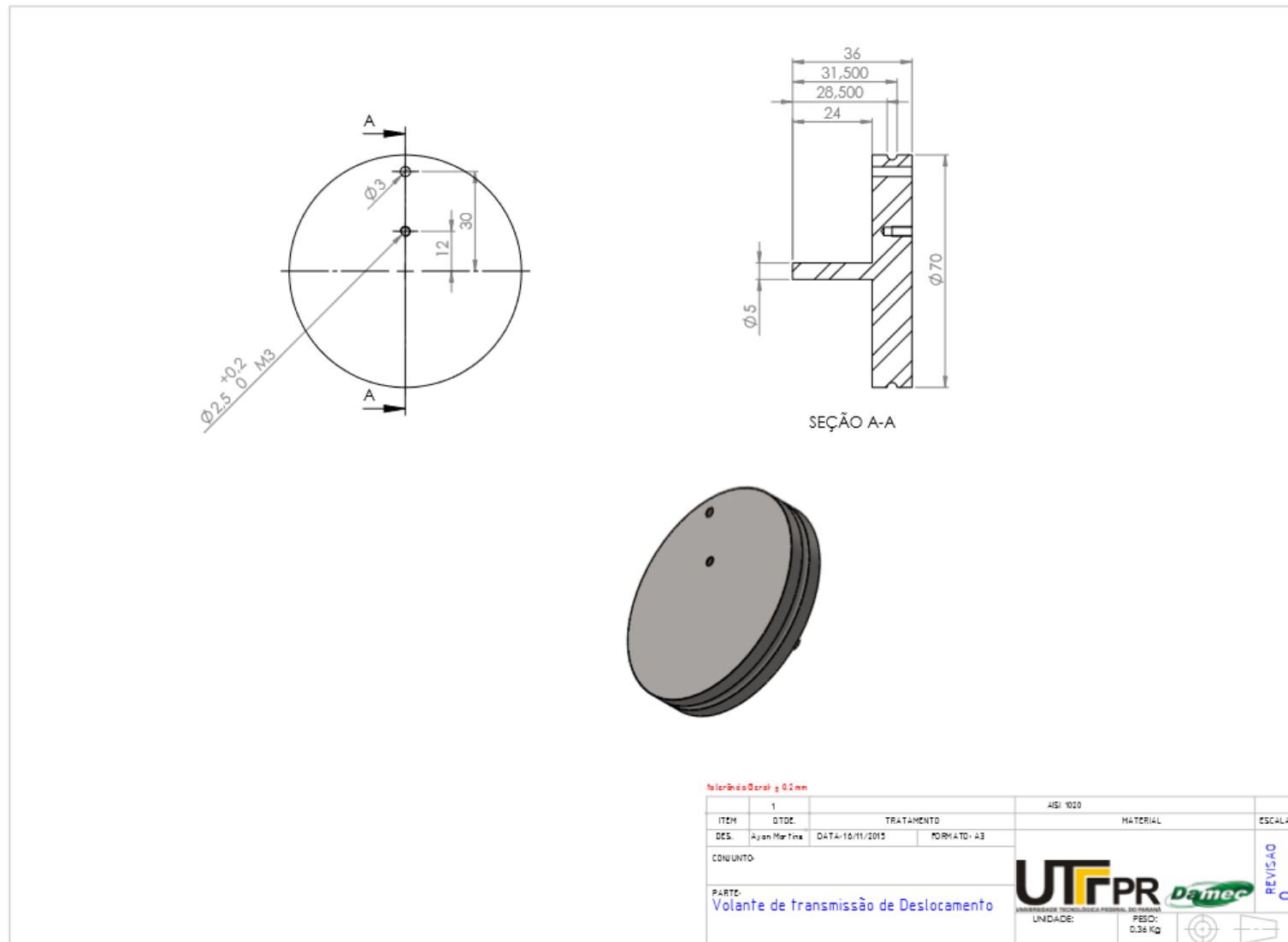
tolerância Geral $\pm 0,2\text{ mm}$

ITEM	DTDE	TRATAMENTO	SW-Material@PeçasLDPRT	MATERIAL	ESCALA
DES.	Ayhan Mar Fina	DATA: 16/11/2010	PROJATO: 43		
CONJUNTO					
PARTE:					
Montagem Sistema de transmissão					
UNIDADE:					
REVISÃO: 0 SW-Material@PeçasLDPRT MASS@PeçasLDPRT					

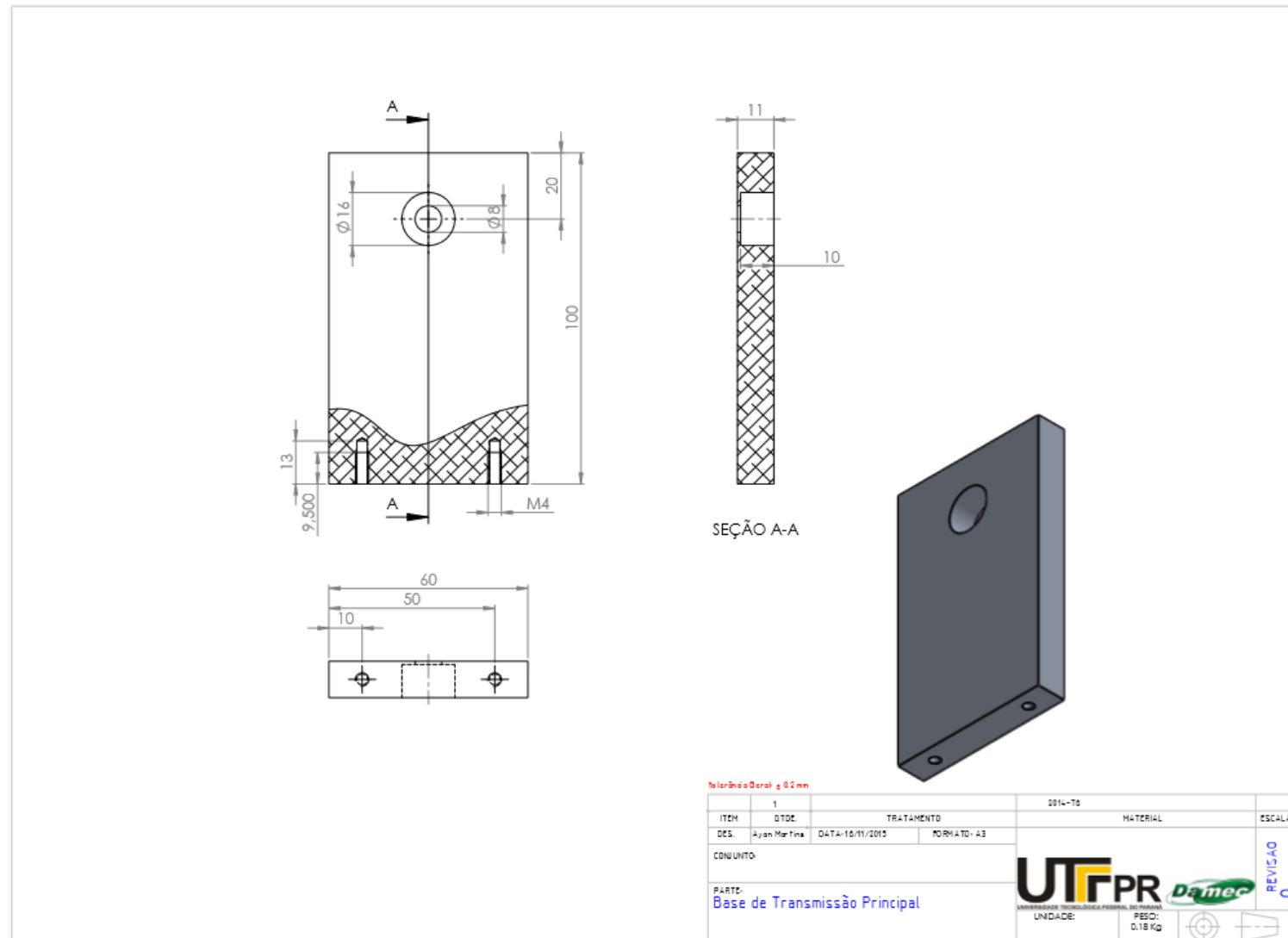
APÊNDICE B21 : VOLANTE DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA



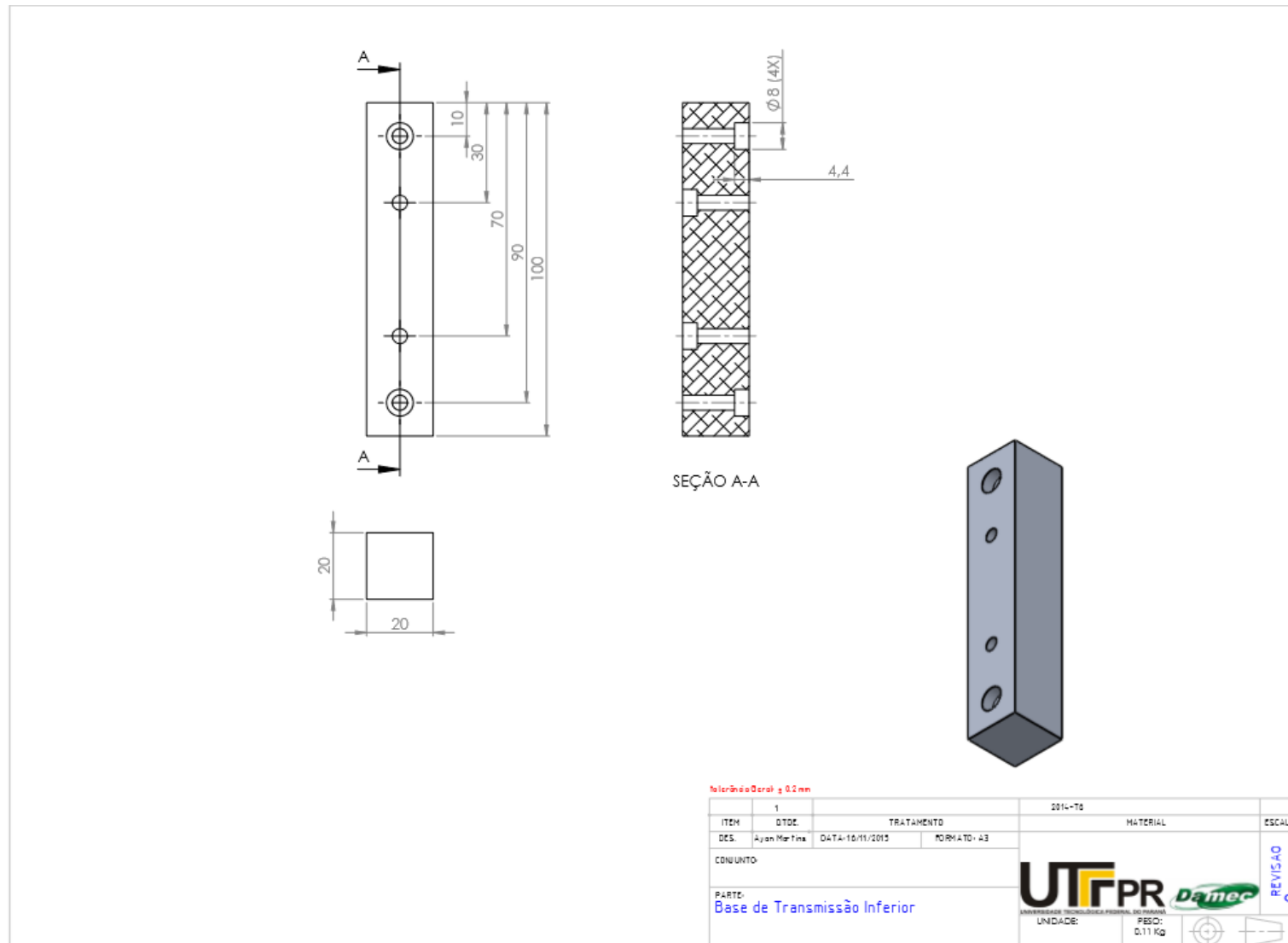
APÊNDICE B22 :VOLANTE DE TRANSMISSÃO DE DESLOCAMENTO



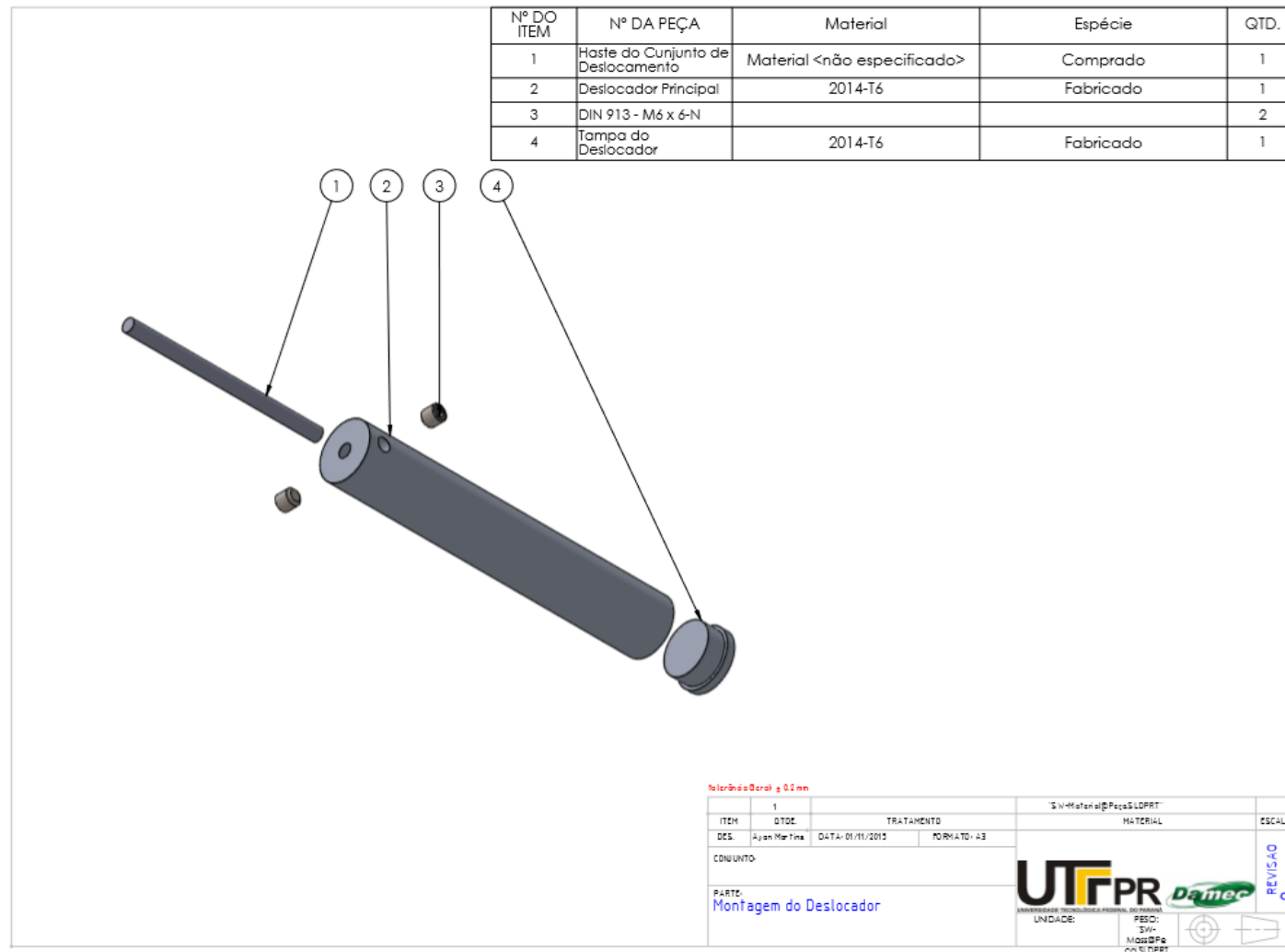
APÊNDICE B23 :BASE DE TRANSMISSÃO PRINCIPAL



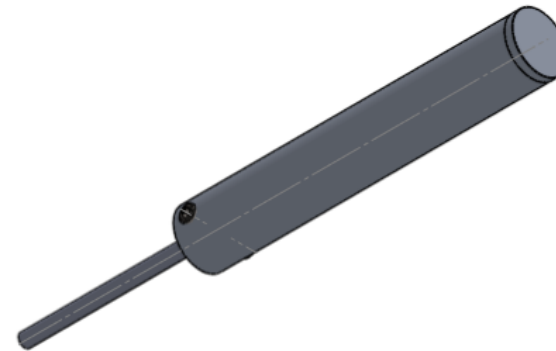
APÊNDICE B24 :BASE DE TRANSMISSÃO INFERIOR



APÊNDICE B25 : MONTAGEM DO DESLOCADOR EM VISTA EXPLODIDA



APÊNDICE B26 : MONTAGEM DO DESLOCADOR



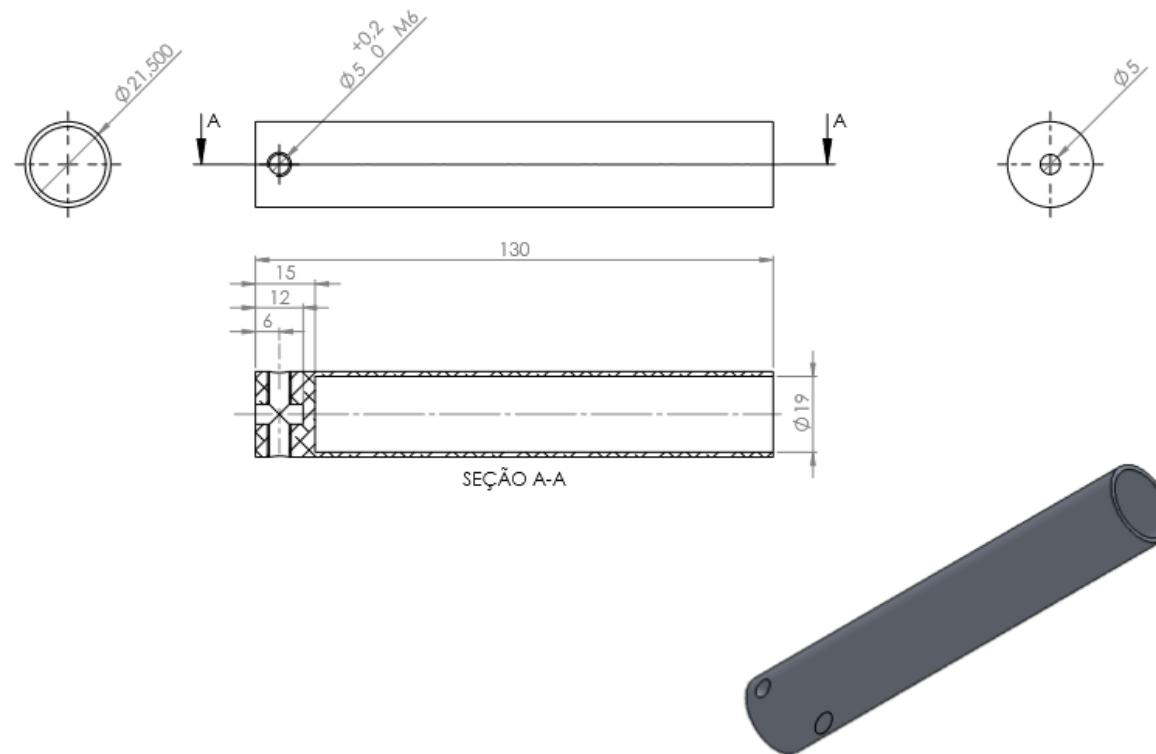
Tolerância Geral ± 0.2mm

ITEM	QTD.	TRATAMENTO	S/W/Material/Peça/SLDPR1	ESCALA
1				
DES.	Ayren Mar Fina	DATA: 01/11/2015	FORMATO: A3	
CONJUNTO				
PARTE: Montagem do Deslocador				
UNIDADE:			RESQ: S/W/ Mass/Fp CO.SLDPR1	REVISAO 0

UTFPR **Da mec**
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ



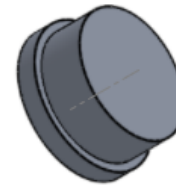
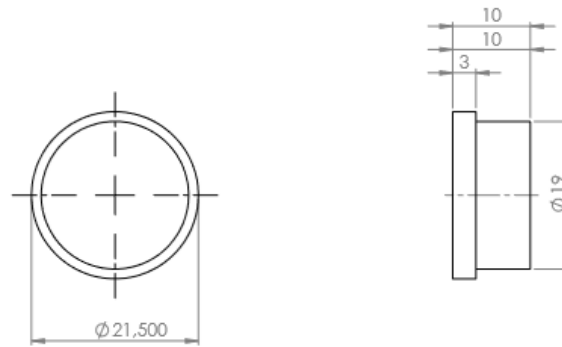
APÊNDICE B27 : DESLOCADOR PRINCIPAL



tolerância geral ± 0,2 mm

ITEM	1	DTDE.	TRATAMENTO	2014-75	MATERIAL	ESCALA
DES.	Ajan Martins	DATA	01/11/2015	FORNITADO	A3	
CONJUNTO						
PARTES	Deslocador Principal					
UNIDADE:			UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			REVISÃO
PESO:	0,04 kg				0	

APÊNDICE B28 :TAMPA DO DESLOCADOR

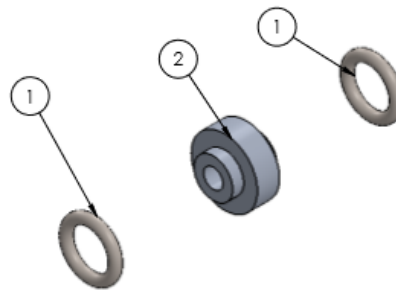


tolerância geral ± 0,2 mm

1		2014-70		
ITEM	QTD.	TRATAMENTO	MATERIAL	ESCALA
DES.	Ajan Mar Tins	DATA: 01/11/2015	FORMATO: A3	
CONJUNTO:				
PARTE: Tampa do Deslocador				
			REVISÃO 0	
UNIDADE:			PESO:	
			0,01 Kg	

APÊNDICE B29 :MONTAGEM DO CONECTOR DAS CÂMARAS

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	Material	Espécie	QTD.
1	O-ring 7.1x1.8-A-ISO 3601-1		Comprado	3
2	Conector das Câmaras	2014-T6	Fabricado	1

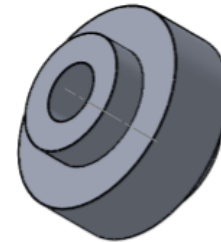
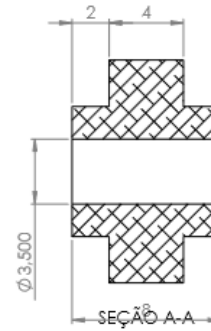
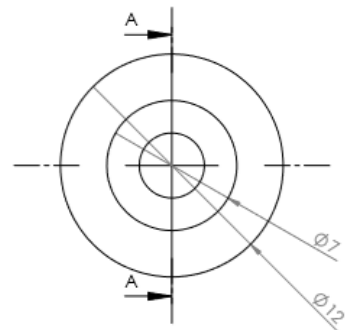


Tolerância Geral $\pm 0.2\text{ mm}$

ITEM	1	TRATAMENTO		'S W-Material@PeçaSLDPR1'	ESCALA
DES.	Ayan Mar Fina	DATA-10/11/2015	FORMATO- A3	MATERIAL	
CONJUNTO					
PARTE: Motor Stirling Tipo Gama					
UNDADE:				PESQ:	
				SU- MossSPe CQSLDPR1	

REVISAO
0

APÊNDICE B30: CONECTOR DAS CÂMARAS



Tolerância Geral $\pm 0,2\text{ mm}$

ITEM	QTD	TRATAMENTO	2014-70	MATERIAL	ESCALA
DES.	Áyzen Mar Faria	DATA: 10/11/2015	FORMATO: A3		
CONJUNTO					
PARTE:					
Conector das Câmaras					
UNIDADE:				FSC:	
				0,00 Kg	

UTFPR DAMEC
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

REVISÃO
0



