

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

DIOGO CESAR FRANZOI BUOSI

REPROJETO DE MOTOR STIRLING TIPO GAMA DIDÁTICO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
NOVEMBRO DE 2016

DIOGO CESAR FRANZOI BUOSI

REPROJETO DE MOTOR STIRLING TIPO GAMA DIDÁTICO

Trabalho apresentado 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.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Hioki

Co-orientador: Prof. Carlos Cziulik, Ph.D

CURITIBA

NOVEMBRO DE 2016

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa: “REPROJETO DE MOTOR STIRLING TIPO GAMA DIDÁTICO”, realizada pelo aluno Diogo Cesar Franzoi Buosi, 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. Daniel Hioki

Co-Orientador: Prof. Carlos Cziulik, Ph.D

UTFPR - Damec

Curitiba, 03 de novembro de 2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa: “REPROJETO DE MOTOR STIRLING TIPO GAMA DIDÁTICO”, realizada pelo aluno Diogo Cesar Franzoi Buosi, 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. Carlos Cziulik, Ph.D.

Damec, UTFPR

Co-orientador

Prof. José Aguiomar Foggiatto, D. Eng

Damec, UTFPR

Avaliador

Prof. Raul Henrique Erthal, M. Sc

Damec, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 7 de dezembro de 2016

RESUMO

Muitas vezes para alunos, o estudo da teoria apenas por meio de referências bibliográficas não se torna suficiente para a sua correta absorção. Para o domínio das teorias que envolvem os motores, torna-se necessária a fabricação de um motor, para que, além do princípio estimulante gerado para este aprendizado, fique mais claro quais são os processos termodinâmicos envolvidos, como é a mecânica de funcionamento, por exemplo. A oportunidade de desenvolver um motor Stirling tipo gama didático (por meio da aplicação de uma metodologia de projeto adequada) com menores custos de fabricação e melhor desempenho se encaixa nas justificativas antes descritas. Logo, o objetivo do presente trabalho visou reprojeter um modelo de motor Stirling tipo *gama*, sendo aplicadas ferramentas de gestão de projeto (como levantamento do estado da arte, mapeamento “AS IS” e estudos de viabilidade), permitindo, ao final, a construção e o funcionamento de um motor com um custo de fabricação 10% inferior e relação potência-peso 60% superior ao modelo reprojeto.

Palavras-chave: Motor Stirling tipo Gama, Reprojeto.

ABSTRACT

Often to students, the study of theory only through references does not become sufficient for their proper absorption of knowledge. To the study of the theories that involve the engines, it is necessary to manufacture an engine, so that, in addition to stimulating principle generated for this learning, the thermodynamic processes involved, how the mechanics of running, for example, become clearer. The opportunity to develop a didactical Stirling engine gamma type (through the application of appropriate design methodology) with lower manufacturing costs and better performance fits the reasons described before. Therefore, the purpose of this study aimed to redesign a model of Stirling engine gamma type with project management tools being applied (such as state of art survey, "AS IS" mapping and feasibility studies) allowing, at the end, the construction and operation of an engine with a 10% lower manufacturing cost and performance (power-weight) 60% higher than the redesigned model.

Keywords: *Stirling Engine Gamma type, Redesign.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Consumo de energia de construções por combustível e cenário. ¹	16
Figura 2: Porcentagem da população, por área, com acesso à água potável.....	17
Figura 3: O Economizador de Robert Stirling.....	21
Figura 4: Componentes principais dos motores Stirling.....	22
Figura 5: Motor na configuração alfa.....	23
Figura 6: Motor na configuração beta.....	24
Figura 7: Motor na configuração gama.....	24
Figura 8: O Ciclo Stirling e seus elementos realizando um ciclo completo.....	26
Figura 9: Motor BMW 4 tempos (a) e Moto BMW R 1200 GS (b).....	28
Figura 10: Motor Wärtsilä-Sulzer RT-flex96C (a) e Navio Maersk classe Triple E (b).....	29
Figura 11: Motor a vapor didático (a) e Funcionamento motor a vapor (b).....	30
Figura 12: O sistema Kockums AIP (a) e Operação do motor Stirling AIP (b).....	30
Figura 13: Produção de energia elétrica a partir da energia solar.....	31
Figura 14: Produção de energia elétrica a partir de gases de aterros sanitários.....	32
Figura 15: Placa mãe (a) e Detalhe do motor Stirling <i>beta</i> de resfriamento (b).....	32
Figura 16: Satélite RHESSI da NASA (a) e o motor Sunpower M77 (b).....	33
Figura 17: Micromotores Stirling <i>Whispergen</i>	33
Figura 18: Motor Stirling educacional <i>AstroMedia</i>	35
Figura 19: Motor Stirling caseiro a R\$300,00 (frete não incluso).....	35
Figura 20: Metodologia de reprojeto geral com base na engenharia reversa.....	37
Figura 21: Integração entre o PDP e os processos de apoio.....	39
Figura 22: Fluxograma das etapas do reprojeto.....	41
Figura 23: Motor Stirling tipo gama a ser reprojeto.....	41
Figura 24: Ilustração dos parâmetros dimensionais de entrada.....	46
Figura 25: Modelagem esquemática do motor.....	48

Figura 26: Comparativo de peso e custo das três opções de materiais.	51
Figura 27: Corpo do motor de Pereira (2015).....	53
Figura 28: Primeira alternativa de corpo de motor.	53
Figura 29: Segunda alternativa de corpo de motor.	54
Figura 30: Terceira alternativa de corpo de motor.....	54
Figura 31: Partes móveis do motor.	55
Figura 32: Partes montadas com ajuste por interferência.	56
Figura 33: Corpo do motor.	64
Figura 34: Pistão deslocador e haste de transmissão.....	64
Figura 35: Pistão de potência.....	65
Figura 36: Sistema de transmissão.	66
Figura 37: Protótipo do Motor Stirling tipo gama.	67
Figura 38: Motor Stirling tipo gama otimizado.	72
Figura 39: Teste de rotação do Motor Stirling.	73
Figura 40: Teste de potência do Motor Stirling.....	73
Figura 41: Curva de velocidade ao longo do tempo.	74
Figura 42: Curva de potência ao longo do tempo.....	74
Figura 43: Teste de rotação do motor Stirling otimizado.	75
Figura 44: Teste de potência do motor Stirling otimizado.	75
Figura 45: Curva otimizada de velocidade ao longo do tempo.....	75
Figura 46: Curva otimizada de potência ao longo do tempo	75
Figura 47: Arranjo esquemático com as principais variáveis do motor Stirling tipo gama ...	85
Figura 48: Cálculos dos valores de saída teóricos e plotagem do Ciclo Stirling.	88
Figura 49: Aleta anular.	89
Figura 50: Parâmetros geométricos da aleta anular.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características principais de motores Stirling e o motor de Pereira.	42
Tabela 2 – Parâmetros dimensionais de entrada	46
Tabela 3 – Parâmetros dimensionais de saída	47
Tabela 4 – Tolerâncias geométricas e de montagem.....	57
Tabela 5 – Comparação de frequência entre as características de Motor Stirling	62
Tabela 6 – Tolerâncias aplicadas e medições do motor Stirling.....	67
Tabela 7 – Peso e Custo Final do Motor.	68
Tabela 8 – Série de otimizações do motor Stirling.	71
Tabela 9 – Tolerâncias aplicadas e medições de componentes otimizados.	72
Tabela 10 – Comparativo dos valores de saída teóricos e experimentais	76
Tabela 11 – Tabela comparativa entre os motores	76
Tabela 12 – Parâmetros dimensionais e de operação	91
Tabela 13 – Parâmetros de fabricação	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Motores Stirling <i>Kontax</i>	34
Quadro 2 – Metodologia de reprojeto de produto.....	38
Quadro 3 – Lista de Materiais, Problemas e Alternativas de Solução.....	43
Quadro 4 – Lista de Opções de Materiais e Orçamentos (sem mão de obra).	50
Quadro 5 – Lista de propostas, economias e custos associados.....	59
Quadro 6 – Lista de equipamentos de medição.....	60

SIMBOLOGIA

T_{max}	Temperatura máxima do ciclo Stirling	[K]
T_{min}	Temperatura mínima do ciclo Stirling	[K]
P	Pressão do motor	[kPa]
V_{se}	Volume percorrido pelo pistão de deslocamento	[m ³]
V_{sc}	Volume percorrido pelo pistão de potência	[m ³]
V_{de}	Volume morto do espaço de compressão	[m ³]
V_r	Volume do regenerador	[m ³]
V_{dc}	Volume morto do espaço de compressão	[m ³]
V_c	Volume momentâneo do espaço de compressão	[m ³]
V	Volume total momentâneo	[m ³]
M	Massa total do fluido de trabalho	[kgf]
R	Constante de gás	[J/mol.K]
T_e	Temperatura do gás no espaço de expansão	[K]
T_c	Temperatura do gás no espaço de compressão	[K]
T_r	Temperatura do gás no regenerador	[K]
D_x	Ângulo de fase	[°]
t'	Temperatura relativa	[K]
v	Volume percorrido relativo	[m ³]
X	Volume morte relativo	[m ³]
n	Rotação do motor	[rpm]
E_e	Energia indicada de expansão	[J]
E_c	Energia indicada de compressão	[J]
E_i	Energia indicada	[J]
P_e	Potência indicada de expansão	[W]
P_c	Potência indicada de compressão	[W]
P_i	Potência indicada	[W]
H	Eficiência indicada	
ε_a	Efetividade de aleta	
q_a	Taxa de transferência de calor da aleta	[W]
$A_{c,b}$	Área da seção transversal de uma aleta na sua base	[m ²]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² .K]
k	Coeficiente de condutividade térmica	[W/m.K]
T_b	Temperatura na base da aleta	[K]

T_{ar}	Temperatura ambiente	[K]
θ_b	Diferença de temperatura entre a base da aleta e o ambiente	[K]
A_a	Área da extremidade de uma aleta	[mm ²]
A_b	Área total da seção transversal das aletas na base	[mm ²]
A_t	Área total aletada	[mm ²]
r_1	Raio interno da aleta	[mm]
r_2	Raio externo da aleta	[mm]
r_{2c}	Raio externo corrigido da aleta	[mm]
L_c	Comprimento característico da aleta	[mm]
L	Diferença entre raio interno e externo da aleta	[mm]
t	Espessura da aleta	[mm]
S	Espaçamento entre aletas	[mm]
N	Número de aletas	[un]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contexto do tema	15
1.2	Caracterização da oportunidade	16
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo geral	18
1.3.2	Objetivos específicos	18
1.4	Delimitação do escopo da pesquisa	18
1.5	Justificativa	19
1.6	Estrutura do trabalho	20
2	MOTOR STIRLING: CONTEXTO E CARACTERÍSTICAS	21
2.1	O Motor Stirling	21
2.1.1	Contexto histórico	21
2.1.2	Componentes principais	22
2.1.3	Configurações	22
2.1.4	Princípio de funcionamento e ciclo termodinâmico	25
2.1.5	Parâmetros dimensionais	27
2.2	Levantamento do Estado da Arte (LEA)	28
2.2.1	Motores de combustão interna	28
2.2.2	Motores de combustão externa	29
2.2.2.1	Motores Stirling	30
2.3	Metodologia de Reprojeto	36
3	METODOLOGIA	40
3.1	Reprojeto Conceitual (Mapeamento “AS IS”)	40
3.2	Reprojeto Preliminar	44
3.2.1	Dimensionamento	45
3.2.1.1	Considerações iniciais	45
3.2.1.1	Parâmetros dimensionais	46
3.2.1.2	Análise da Teoria de Schmidt	47
3.2.2	Seleção de Materiais	48
3.2.2.1	Vedação na câmara de deslocamento e na haste de transmissão	48
3.2.3	Aspectos Construtivos	51
3.2.3.1	Corpo Principal do Motor	52
3.2.3.2	Partes Móveis	54
3.2.3.3	Ajuste por Interferência	56
3.2.3.4	Tolerâncias geométricas e de montagem	56
3.2.3.5	Aletamento de superfície	57
3.2.3.6	Relação Custo-Benefício	58
3.2.4	Bancada de medições	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Reprojeto Detalhado	61
4.1.1	Corpo do motor e câmara de aquecimento	62
4.1.1.1	Material	62
4.1.1.2	Formato	63
4.1.1.3	Aletamento de superfície	63
4.1.2	Partes móveis	64
4.1.2.1	Pistão deslocador e Haste de transmissão	64
4.1.2.2	Pistão de potência	65

4.1.2.3	Sistema de transmissão (volantes, bielas e eixo)	65
4.1.3	Base e suporte	66
4.1.4	Tolerâncias aplicadas e medições	66
4.1.5	Protótipo	67
4.1.6	Custo final do reprojeto sem otimização	67
4.1.7	Ajustes, otimizações e funcionamento	68
4.1.7.1	Redução de atrito	68
4.1.7.2	Otimização da troca térmica	70
4.1.7.3	Otimização de materiais	70
4.1.7.4	Resumo das otimizações	71
4.1.8	Resultados experimentais	72
4.1.8.1	Resultados com maçarico de acetileno	73
4.1.8.1	Resultados com maçarico de butano	74
4.1.8.1	Resultados comparativos	76
5	CONCLUSÕES	77
5.1	Sugestões	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A – ANÁLISE DOS VALORES DE SAÍDA TEÓRICOS (TEOREMA DE SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING TIPO GAMA)	84
	APÊNDICE B – ANÁLISE DE VIABILIDADE DE ALETAMENTO	89
	APÊNDICE C – TEMPO, CUSTOS E PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO	92
	APÊNDICE D1-A – VISTA EXPLODIDA DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA	94
	APÊNDICE D1-B – MONTAGEM DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA	95
	APÊNDICE D2 – BASE MOTOR	96
	APÊNDICE D3 – SUPORTE MOTOR	97
	APÊNDICE D4 – CÂMARA DE DESLOCAMENTO	98
	APÊNDICE D5 – CÂMARA DE AQUECIMENTO	99
	APÊNDICE D6 – CÂMARA DE RESFRIAMENTO	100
	APÊNDICE D7 – PISTÃO DESLOCADOR	101
	APÊNDICE D8 – HASTE DE TRANSMISSÃO	102
	APÊNDICE D9 – PISTÃO DE POTÊNCIA	103
	APÊNDICE D10 – BIELA	104
	APÊNDICE D11 – VOLANTE DE TRANSMISSÃO	105
	APÊNDICE D12 – EIXO DE TRANSMISSÃO	106
	APÊNDICE D13 – CONECTOR	107
	APÊNDICE D14 – CÂMARA DE RESFRIAMENTO OTIMIZADA	108
	APÊNDICE D15 – PISTÃO DE POTÊNCIA OTIMIZADO	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do tema

A necessidade do homem em executar tarefas que demandem uma elevada quantidade de força sempre o levou a utilizar diferentes tipos de fontes motoras (no início, tração animal, correntes de água e vento e a própria força humana). Devido à essa necessidade, o avanço tecnológico permitiu ampliar e inovar os métodos de transformação de energia térmica em mecânica. Turbinas, máquinas à vapor e motores de combustão são os principais responsáveis por possibilitar um maior conforto para o homem desde então.

O funcionamento de máquinas térmicas, turbinas e motores, contudo, só ocorre com o uso de alguma fonte de energia, tal como a água, o vento, combustíveis fósseis, energia nuclear, entre outras. Infelizmente, a maioria dessas fontes trazem algum dano ao meio ambiente. Além disso, as fontes não-renováveis de energia, como o petróleo e o carvão, por exemplo, irão esgotar devido ao seu uso incessante.

Essa preocupação com o meio ambiente, devido à necessidade de redução da emissão de poluentes, tem trazido destaque ao uso de fontes alternativas de combustível. Se apresentando como uma nova tendência na geração de eletricidade, as energias renováveis vêm recebendo atenção por meio de estudos, pesquisas e investimentos desde o final do século XX (BARROS, 2005).

O uso de motores Stirling vem despertando o interesse, principalmente devido à sua característica de motor de combustão externa, sendo possível utilizar diferentes combustíveis (ou até mesmo energia solar como fonte), pois se necessita apenas de uma fonte quente, independentemente do tipo de combustível (BARROS, 2005).

Esses motores oferecem alta eficiência com baixa emissão de poluentes em comparação com os motores de combustão interna, além de serem limpos e funcionarem silenciosamente (TAVAKOLPOUR, ZOMORODIAN e GOLNESHAN, 2008).

Neste trabalho serão estudadas as características principais do motor Stirling para que, por meio da aplicação de uma metodologia de reprojeto adequada, um motor Stirling tipo gama seja reprojeto com foco na redução dos custos de fabricação.

1.2 Caracterização da oportunidade

Em relação às fontes de energia não-renováveis, têm-se expectativas de que as reservas de petróleo durem por aproximadamente 75 anos, as de gás natural por aproximadamente 100 anos e as de carvão mineral por aproximadamente 200 anos (MATOZZO, 2001).

Segundo estimativas do IEA (Agência Internacional de Energia), para o setor de construções, a demanda das várias fontes de energia irá aumentar até 2050. A Figura 1 evidencia em dois cenários (um deles considera a redução de 50% das emissões de CO₂) um aumento do uso de energias renováveis.

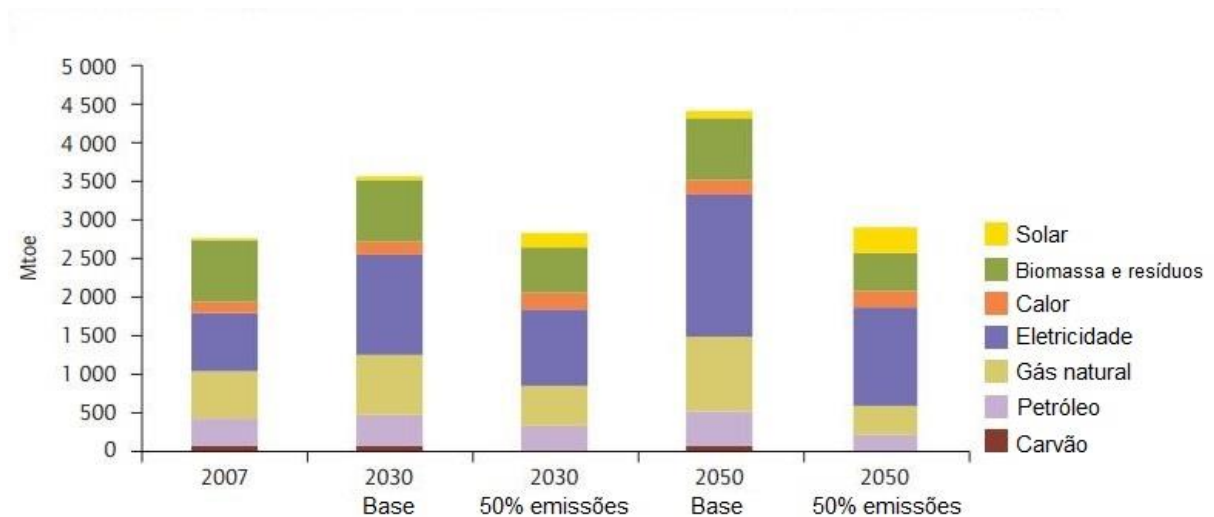


Figura 1: Consumo de energia de construções por combustível e cenário.¹

Fonte: International Energy Agency (2011).

Segundo o IBGE, no Brasil em 2010 havia 1,3% de domicílios sem energia elétrica, com maior incidência nas áreas rurais do país (7,4%). A situação extrema era a da região Norte, onde 24,1% dos domicílios rurais não possuíam energia elétrica, seguida das áreas rurais do Nordeste (7,4%) e do Centro-Oeste (6,8%). (IBGE, 2011).

Ainda, de acordo com dados recentes da UNICEF (2014), 663 milhões de pessoas não possuem acesso a água potável. Aliás, um dos motivos para esse número alarmante é o fato de muitas áreas em países subdesenvolvidos não possuírem um investimento em saneamento adequado. A Figura 2 apresenta a porcentagem da população com acesso a este recurso tão necessário.

¹ Todas as figuras, tabelas e quadros sem indicação explícita da fonte foram produzidas pelo autor do trabalho.

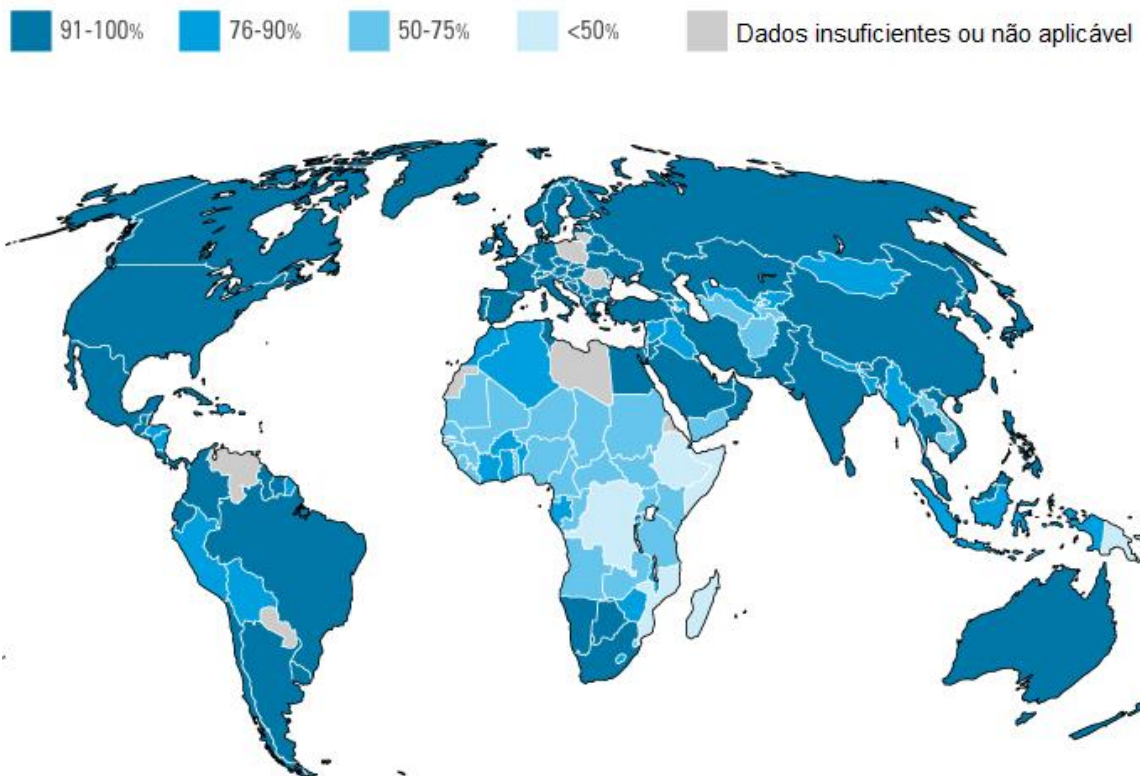


Figura 2: Porcentagem da população, por área, com acesso à água potável.

Fonte: UNICEF (2014).

A crescente necessidade de diversificar os equipamentos com aplicações cotidianas importantes (como o uso de máquinas que auxiliem no fornecimento de água em regiões com escassez, ou a geração de energia em áreas remotas), a nova tendência de geração de energia por meio de fontes alternativas e a existência de um modelo de motor Stirling tipo gama a ser reprojetoado são oportunidades que tornam o presente estudo atrativo.

Vale ressaltar que, no início, quando os primeiros motores do tipo Stirling foram produzidos, a falta de materiais com melhor condutividade térmica e o nível não tão elevado dos processos de fabricação envolvidos não permitiram que esses motores possuíssem uma boa relação peso/potência. Esses fatos ajudaram a elevar o custo de fabricação. Com o avanço da qualidade de materiais, dos processos de fabricação e dos outros fatores acima expostos, a utilização e melhoria de motores Stirling será fundamental, tornando-se um importante objeto de estudo e desenvolvimento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é reprojeter, por meio da aplicação de uma metodologia de reprojeto, o motor Stirling tipo gama, desenvolvido por Pereira (2015), para fins didáticos. Uma proposta será elaborada para a redução dos custos de fabricação do motor. Para isso, serão utilizadas ferramentas de gestão de desenvolvimento de produto que irão auxiliar no processo do reprojeto.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos a serem desenvolvidos:

- a. Realizar um levantamento do estado da arte, de forma a obter uma visão sobre patentes e protótipos existentes, bem como as suas principais aplicações;
- b. Analisar as principais características de um modelo de motor Stirling tipo gama, evidenciando as suas diferenças no que se refere aos modelos de mercado e ao protótipo desenvolvido por Pereira (2015);
- c. Avaliar as principais limitações de projeto e os pontos a serem modificados para a melhoria do modelo analisado e para a redução dos custos de fabricação;
- d. Apresentar uma proposta de melhoria do modelo, buscando soluções de projeto e fabricação;
- e. Fabricar e testar o novo protótipo, sob as mesmas condições operacionais do protótipo de Pereira (2015), fornecendo medições de potência e rotação, comparando os protótipos e evidenciando as melhorias obtidas.

1.4 Delimitação do escopo da pesquisa

A concretização dos objetivos específicos do trabalho e as contribuições pretendidas são condicionadas a uma delimitação de escopo da pesquisa. Isso se deve muito em função à natureza complexa do desenvolvimento completo de uma metodologia de reprojeto e das muitas aplicações (e áreas envolvidas) que um motor possui. Para isso, serão considerados os seguintes limites ou enfoques:

- a. O reprojeto se dará com base no enfoque na redução dos custos de fabricação e na escolha de materiais e processos de fabricação adequados dos componentes;
- b. O próprio enfoque didático que este trabalho possui se deve muito em função das variadas aplicações que poderiam ser atribuídas. Com isso, o objetivo é restringido para um propósito específico: a busca pelo simples funcionamento do motor Stirling tipo gama em condições operacionais preestabelecidas.

1.5 Justificativa

Apesar de atualmente haver uma grande gama de equipamentos e tecnologias que fazem uso de energias renováveis, o desenvolvimento tecnológico e a demanda da indústria por motores mais eficientes torna a busca por melhorias essencial para a diversificação das suas aplicações e para a própria evolução desse tipo de equipamento.

Sendo assim, a proposta de elaborar uma metodologia, com o apoio de ferramentas próprias da gestão de projetos, para reprojeter um motor Stirling tipo gama, será capaz de gerar melhorias consideráveis no desempenho do motor (aumento da relação potência/peso de 60%) e reduzir os custos de fabricação (redução de 10%), apresentando-se como uma oportunidade e um grande potencial de aprendizado, propiciando, além de um enriquecimento na formação do estudante de engenharia, um trabalho que pode servir como um guia prático relacionado à gestão de projetos.

Visto que este trabalho contempla o estudo de diversas áreas da engenharia, como a análise de materiais, o dimensionamento estrutural de componentes, ciências térmicas, processos de fabricação, análise e gestão de projetos – o que possibilita o desenvolvimento da interdisciplinaridade e da gestão do tempo –, o propósito didático proporcionará ao aluno um aprofundamento dos seus conhecimentos nessas áreas. A facilidade de fabricação e a baixa complexidade deste tipo de motor permitirão ao final, com a construção do protótipo, consolidar esses conhecimentos e incentivar ainda mais a busca contínua por soluções de melhoria e aplicações.

1.6 Estrutura do trabalho

O capítulo 1 contém algumas informações sobre o tema do presente trabalho, apresentando as oportunidades para o desenvolvimento de um motor Stirling, os principais objetivos (com a delimitação do escopo de pesquisa), bem como as justificativas mais relevantes.

No capítulo 2 há uma abordagem sobre os principais aspectos dos motores Stirling, como contexto, componentes principais, configurações, princípio de funcionamento, entre outros. Ainda, um levantamento do estado da arte foi realizado para listar os principais motores do mercado, didáticos ou não. Ao final, alguns conceitos sobre metodologia de projeto foram levantados para situar o leitor para o próximo capítulo.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Por meio do mapeamento “AS IS”, foram reunidas informações pertinentes para fabricação do motor Stirling tipo gama, salientando as características e limitações do motor de Pereira (2015), as principais alternativas de melhoria e soluções gerais de reprojeção. Levou-se em conta, para esta parte do trabalho, o enfoque definido na delimitação do escopo de pesquisa, a redução dos custos de fabricação.

O capítulo 4 apresenta os principais resultados obtidos com a fabricação do motor Stirling, sendo detalhadas todas as soluções de projeto escolhidas. Uma longa discussão foi realizada a respeito dos ajustes e otimizações realizados para o atingimento dos objetivos do trabalho. Dados de desempenho, como rotação e potência foram medidos e mostrados, assim como os principais custos envolvidos. Todos os dados de resultado foram comparados com o projeto base de Pereira (2015).

Ao final, no capítulo 5, as principais conclusões obtidas com os resultados do capítulo anterior foram descritas. Ainda, foram listadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 MOTOR STIRLING: CONTEXTO E CARACTERÍSTICAS

2.1 O Motor Stirling

2.1.1 Contexto histórico

Robert Stirling e seu irmão James Stirling, inventaram o motor Stirling em 1816 com a intenção de criar uma máquina a vapor não dependente de caldeiras ou vasos de pressão, os quais ofereciam altos riscos de operação, trabalhando com elevadas pressões de vapor. A ideia básica era converter qualquer diferença de temperatura em movimento e trabalho. (BARROS, 2005)

Na criação do primeiro motor de ciclo fechado deste tipo, evidenciado na Figura 3, o calor é gerado pela queima de um combustível em uma fornalha, os gases da combustão passam por B e F e saem em uma chaminé em A. Em F, está posicionada a parte quente do motor Stirling. O pistão deslocador C é o responsável por deslocar o fluido de trabalho do espaço de expansão para o de compressão. O pistão D é o de potência. Com o aquecimento do fluido de trabalho na parte quente do motor (espaço de expansão) e o resfriamento na parte fria (espaço de compressão), e com um mecanismo para sincronizar o movimento destes pistões, havia o funcionamento do motor.

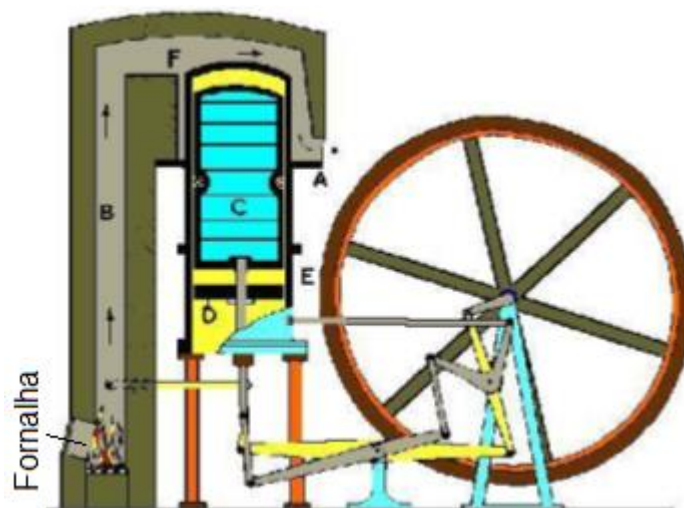


Figura 3: O Economizador de Robert Stirling.

Fonte: Cooling (2002).

A simplicidade construtiva e a segurança na operação, o funcionamento silencioso e limpo, juntamente com a utilização de qualquer combustível, tornaram este motor de 100W a 4kW de potência bastante popular na época.

2.1.2 Componentes principais

Os motores Stirling são constituídos pelos seguintes componentes principais: **pistão de potência** (conectado a um disco por meio de uma biela para fornecer a potência de saída do motor); **pistão deslocador** (move o ar de um lado a outro na câmara); **regenerador** (facultativo, sendo formado por uma malha metálica localizada entre os trocadores de calor quente e frio com a finalidade de receber e ceder calor ao fluido de trabalho aumentando a eficiência do ciclo). Na Figura 4 é possível visualizar esses e outros componentes que fazem parte do motor Stirling.

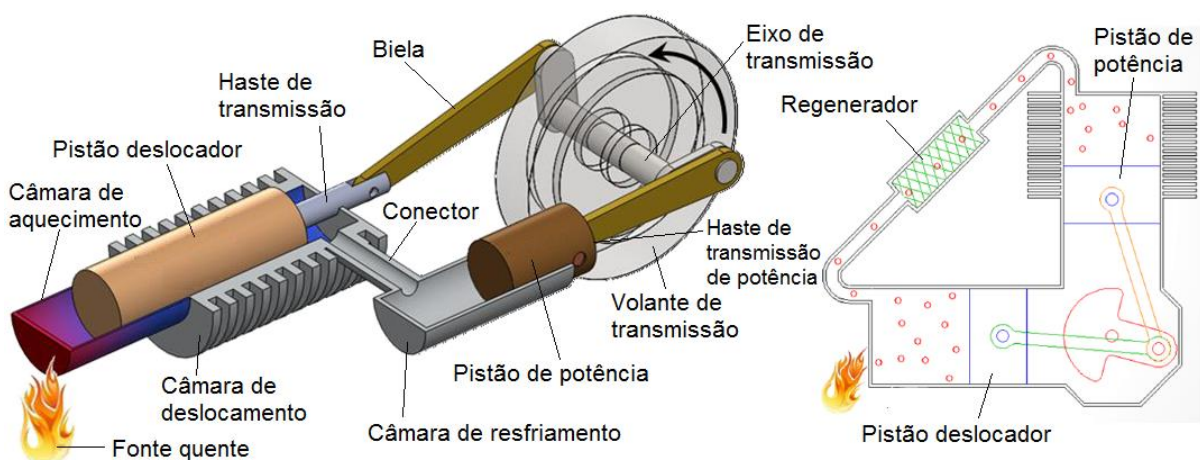


Figura 4: Componentes principais dos motores Stirling.
Fonte: Cooling (2002).

2.1.3 Configurações

Originalmente, os tipos de motores Stirling são classificados em três configurações 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 aquecimento e resfriamento identificam a forma na qual o pistão deslocador 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).

a. Motores Stirling de dois pistões

O motor Stirling de dois pistões é o que caracteriza o chamado motor Stirling tipo alfa. Este tipo de motor tem dois pistões (deslocador e de potência) defasados em 90°, e são conectados em série pela câmara de aquecimento, o regenerador e a

câmara de resfriamento. Há um lado quente (espaço de expansão) e um lado frio (espaço de compressão), unidos entre si. Os dois pistões em conjunto comprimem o fluido de trabalho na câmara de resfriamento, movimentam o fluido para a câmara de aquecimento onde ele se expande e depois retorna para a câmara de resfriamento (MARTINI, 1983).

Embora possua a configuração mais simples, o motor alfa (Figura 5) apresenta a desvantagem de ambos os pistões necessitarem de vedação por conter fluido de trabalho. Esses motores podem ser construídos em configurações compactas, com múltiplos cilindros e elevadas potências de saída, necessárias para aplicações automotivas, por exemplo.

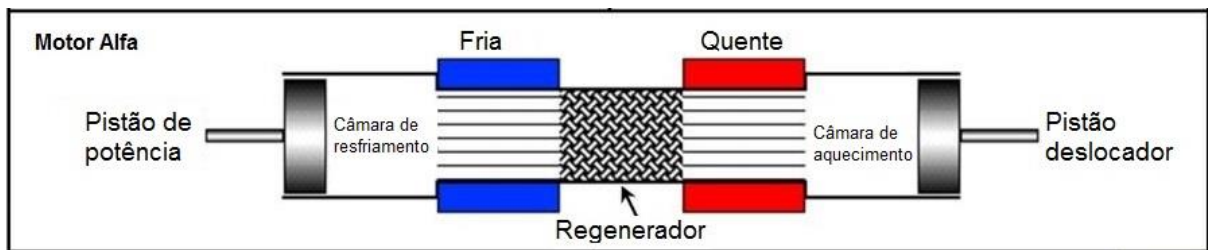


Figura 5: Motor na configuração alfa.

Fonte: Barros (2005).

b. Motores Stirling do tipo deslocamento

Em motores Stirling do tipo deslocamento, o fluido de trabalho é movimentado do espaço de alta para o de baixa temperatura pelo deslocador, enquanto o pistão de potência faz a compressão e a expansão do gás. Existem dois tipos de motores Stirling de deslocamento: motor Stirling tipo beta e motor Stirling tipo gama (MARTINI, 1983).

Na configuração beta, o pistão deslocador e o pistão de potência estão alinhados em um único cilindro. Pela sobreposição entre cada movimento de ambos os pistões, uma taxa de compressão maior do motor é obtida, e pode-se obter maior potência que o motor Stirling tipo gama. Entretanto, as hastes do pistão deslocador e do pistão de potência estão alinhadas, o que torna o mecanismo complicado (HIRATA, 1995).

O motor beta apresenta a configuração clássica e é ilustrada na Figura 6:

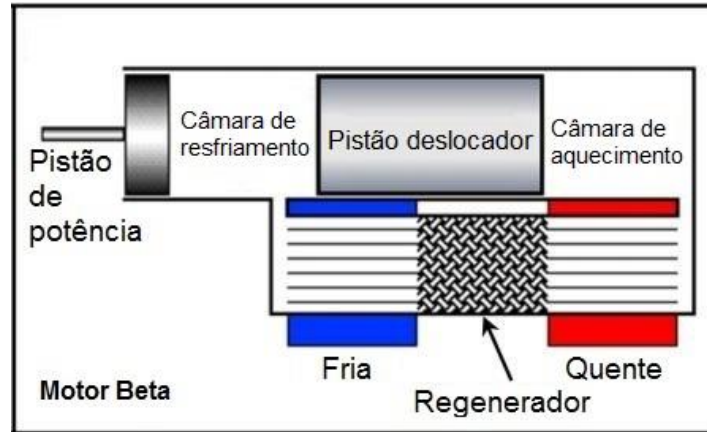


Figura 6: Motor na configuração beta.

Fonte: Barros (2005).

O motor gama tem um pistão deslocador análogo ao do motor beta. Porém, este é posicionado em outro cilindro (Figura 7). Essa configuração possui a característica de separar a câmara de aquecimento, que é relacionado ao pistão deslocador, da câmara de resfriamento, relacionado ao pistão de potência (PAUTZ, 2013).

Relacionado com o motor beta, o motor gama tem uma forma construtiva mais simples, com melhores taxas de compressão e maior área superficial de transferência de calor. Porém, possui maiores volumes mortos e menor potência de saída pelo fato de que uma parcela do processo de expansão se dá no espaço de compressão (HIRATA, 1995).

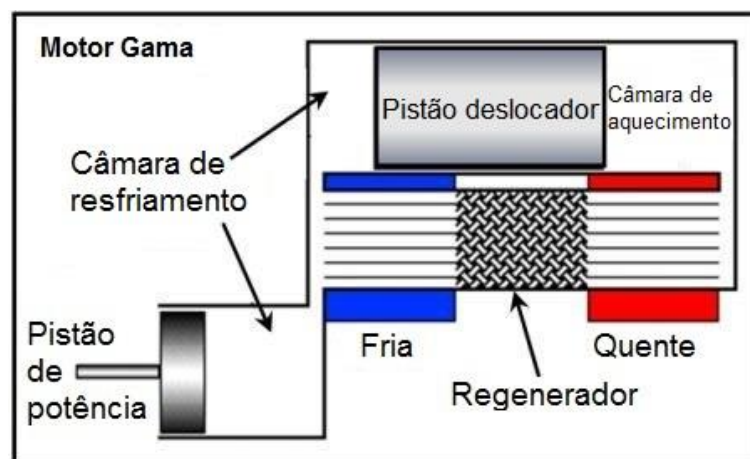


Figura 7: Motor na configuração gama.

Fonte: Barros (2005).

Resumindo, o motor alfa é recomendado para aplicações que requerem uma maior potência, possuindo uma configuração mais simples. Pode inclusive ser

aproveitado, como base para a sua construção, motores de combustão interna e compressores. Já o motor beta, apesar de poder gerar uma pressão maior, devido a sobreposição do movimento de seus pistões, tem um mecanismo de guia (virabrequim e demais partes do mecanismo de potência) muito complicado, e de difícil fabricação. O motor gama tem um mecanismo mais simples em comparação com o beta. Porém, apresenta alguns inconvenientes de perdas, por apresentar maiores volumes mortos, e como comentado, parte de o processo de expansão ocorrer no espaço de compressão e vice-versa (BARROS, 2005).

2.1.4 Princípio de funcionamento e ciclo termodinâmico

Em comparação aos motores de combustão interna usuais, o princípio de funcionamento do Motor Stirling se difere. Comumente contendo um gás (ar, hidrogênio ou hélio), chamado de fluido de trabalho, dentro dos cilindros, o funcionamento do Motor Stirling se dará a partir do aquecimento e resfriamento desse fluido de trabalho externamente a esses cilindros (BARROS, 2005).

É por meio desse aquecimento e resfriamento que ocorre a expansão e a contração do fluido de trabalho que se movimenta do lado frio para o lado quente devido ao movimento dos pistões para motores tipo alfa, e pelo movimento de um pistão deslocador para motores tipos beta e gama.

Esse princípio é baseado em um ciclo fechado, onde o fluido de trabalho é mantido dentro dos cilindros e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho com a ajuda de trocadores de calor. Frequentemente utilizam-se aletas na superfície externa dos cilindros, visando aumentar a superfície de troca de calor. Segundo Angelino (1996), o motor Stirling também funciona como um sistema reversível. Dependendo da forma de energia cedida para o sistema, ele pode operar como uma bomba de calor ou como um sistema de refrigeração.

O ciclo ideal de Stirling consiste de dois processos isotérmicos e dois processos isocóricos e opera entre mínima e máxima temperaturas, T_{\min} e T_{\max} (T_{\max} depende do material de construção do motor). As etapas são ilustradas na Figura 8:

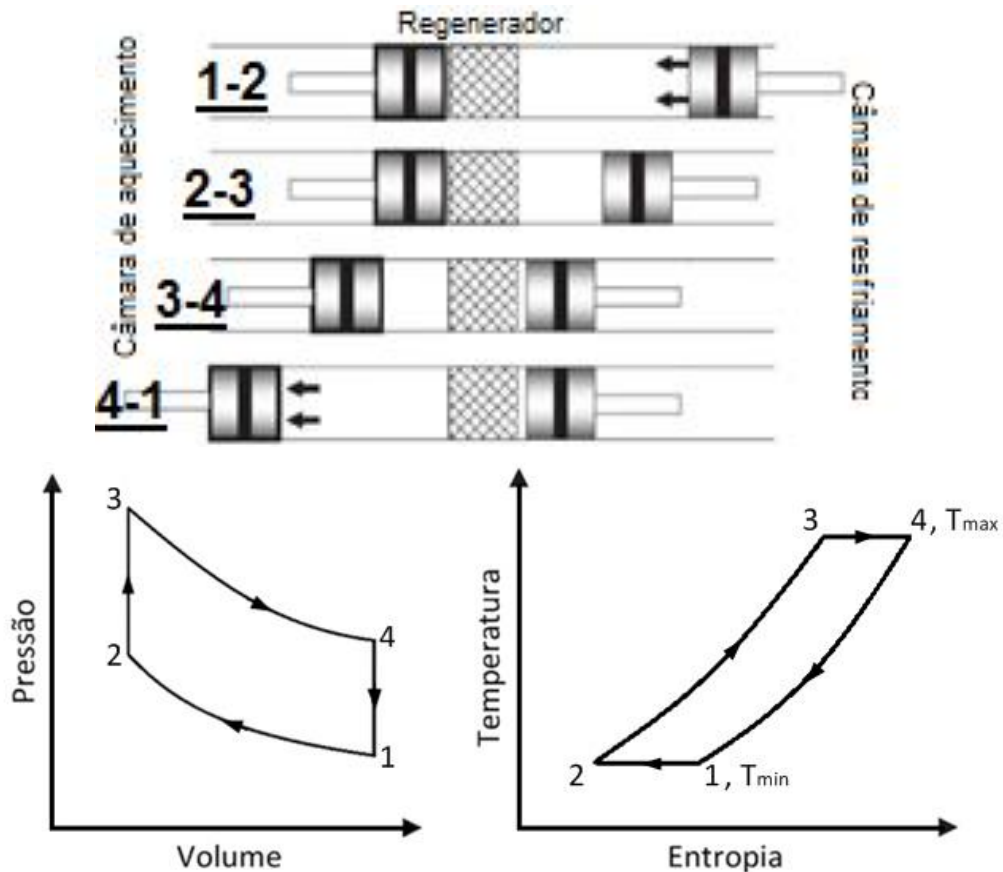


Figura 8: O Ciclo Stirling e seus elementos realizando um ciclo completo.
 Fonte: Adaptado de Thombare; Verma (2008 p. 7).

a. Processo de compressão isotérmica 1-2

O pistão de potência se move para a esquerda e o fluido de trabalho é comprimido, enquanto o pistão deslocador continua imóvel. A pressão aumenta de P_1 para P_2 (devido à redução de volume da câmara) e a temperatura permanece constante em T_{min} (processo isotérmico). A energia interna se mantém inalterada, havendo um decréscimo na entropia.

b. Processo de aquecimento a volume constante 2-3

Os pistões deslocador e de potência se movem, forçando o fluido de trabalho a passar através do canal de conexão para a câmara de aquecimento, de forma que o volume entre os êmbolos permanece constante. Logo, há o acréscimo de temperatura do fluido de trabalho à volume constante e também da pressão do sistema de P_2 para P_3 .

c. Processo de expansão isotérmica 3-4

O pistão deslocador ainda se movimenta para a esquerda e o fluido de trabalho se expande, enquanto que o pistão de potência continua imóvel. A pressão diminui de P_3 para P_4 conforme o volume aumenta e a temperatura permanece constante devido ao aquecimento externo pela fonte quente.

d. Processo de resfriamento a volume constante 4-1

Os dois pistões se movimentam, forçando agora o fluido de trabalho a passar através do canal de conexão para a câmara de resfriamento, de forma que o volume entre os êmbolos permanece constante. A temperatura do fluido de trabalho é reduzida a T_{min} , assim como a pressão do sistema de P_4 para P_1 .

2.1.5 Parâmetros dimensionais

É importante mencionar que o pistão deslocador não deve ser posicionado de forma a encostar na parede da câmara que o cerca. Uma folga deve existir para que o fluido de trabalho se mova entre as câmaras de aquecimento e resfriamento. Folgas excessivas não permitem que o pistão deslocador se mova pela expansão do fluido de trabalho a partir do seu aquecimento, assim como folgas mais justas não permitem a passagem mais livre desse fluido ao longo do cilindro. Segundo Walker (1980), essa folga (diametral) entre o pistão deslocador e a parede da câmara de aquecimento/deslocamento não deve ultrapassar valores superiores a 0,76mm e inferiores a 0,38mm.

Segundo Ross (2011), para motores pequenos, a configuração gama é interessante visto sua simplicidade, robustez e facilidade de ajuste. Por outro lado, a distância entre os eixos das câmaras de deslocamento e resfriamento é relativamente grande, acarretando a um aumento do volume morto. O volume morto (principalmente no que se refere ao volume do conector dessas câmaras) possui papel importante para a eficiência geral do motor. A princípio, quanto maiores forem as folgas entre os pistões e os cilindros e também quanto maior for o comprimento do conector (assim como seu diâmetro interno), maiores serão as perdas, o que pode ocasionar redução na potência de saída do motor.

2.2 Levantamento do Estado da Arte (LEA)

O levantamento do estado da arte é necessário desde já para o melhor entendimento das principais aplicações dos motores na atualidade. Deste modo, todas as informações pertinentes sobre os aspectos que envolvem o motor Stirling são reunidas para cercar e delimitar o estudo a ser desenvolvido.

Sendo assim, a reunião de informações sobre motores com outras configurações (motores Stirling do tipo alfa e beta) e com diferentes tipos de funcionamento (combustão interna, por exemplo) é necessária para que se tenha uma visão mais abrangente dos motores, bem como uma visão específica voltada para os motores Stirling.

2.2.1 Motores de combustão interna

Os principais tipos de motores de combustão interna são os que possuem o ciclo Otto e o ciclo diesel como princípio de funcionamento. O motor a combustão interna ciclo Otto é uma máquina que trabalha com os princípios da termodinâmica e com os conceitos de compressão e expansão de fluidos gasosos para gerar força e movimento rotativo, se caracterizando pela ignição por faísca.

Muitos motores ciclo Otto são usados no setor automobilístico, por possuírem boa relação de peso/potência. Utilizam geralmente gasolina e álcool como principais combustíveis e ar como fluido de trabalho. Na Figura 9a, tem-se um motor BMW 4 tempos de 1170cc com potência de 100cv à 7750rpm, usado nas motos BMW R 1200 GS (Figura 9b).

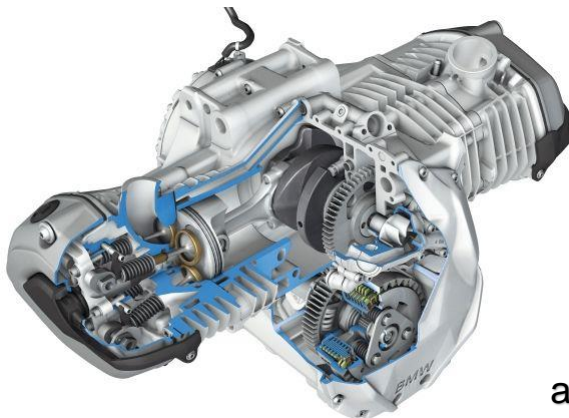
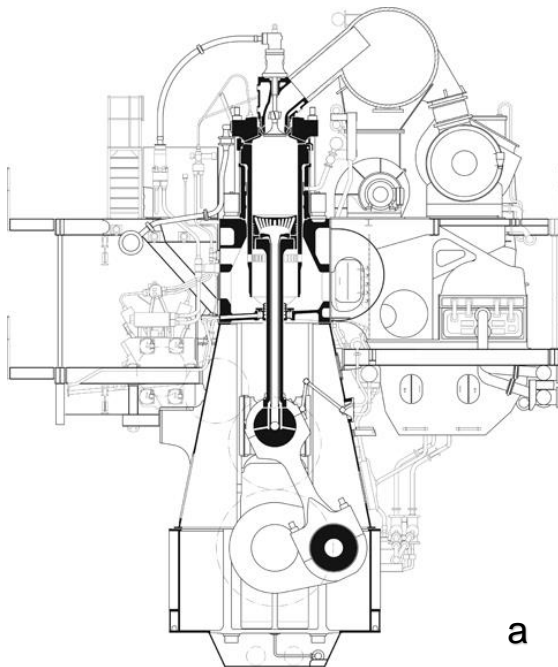


Figura 9a: Motor BMW 4 tempos.
Fonte: BMW Groups.



Figura 9b: Moto BMW R 1200 GS.

Já o motor de combustão interna ciclo Diesel se caracteriza pela ignição por compressão (o fluido de trabalho é comprimido e quando em contato com o combustível, é gerada a combustão), sendo o óleo Diesel o combustível mais usado. Geralmente, este tipo de motor é empregado em veículos pesados, como trens, caminhões e navios. As Figuras 10a e 10b mostram o maior motor diesel do mundo e o navio em que ele é utilizado (sendo também o maior cargueiro mundo). Para se ter noção, o diâmetro de um pistão chega a quase 1 metro, e cada pistão possuindo aproximadamente 8200cv de potência. O cargueiro consegue transportar 18 mil contêineres e utiliza dois motores Wärtsilä-Sulzer RT-flex96C para as suas duas hélices de 9,8 metros de diâmetro.



a



b

Figura 10a: Motor Wärtsilä RT-flex96C **Figura 10b: Navio Maersk classe Triple E**
 Fonte: Diesel Army (2014).

2.2.2 Motores de combustão externa

Há vários tipos de motores de combustão externa. Um deles é o chamado motor ou turbina a vapor, que explora a pressão do vapor para gerar energia mecânica. Os motores a vapor foram muito usados no início em locomotivas, caldeiras e transporte marítimo. Logo em seguida, as turbinas a vapor seriam amplamente utilizadas por possuírem maior eficiência. Atualmente, os motores a vapor são bem utilizados em reatores nucleares nos processos de geração de energia elétrica. A Figura 11a apresenta um motor a vapor didático e a Figura 11b o seu funcionamento.

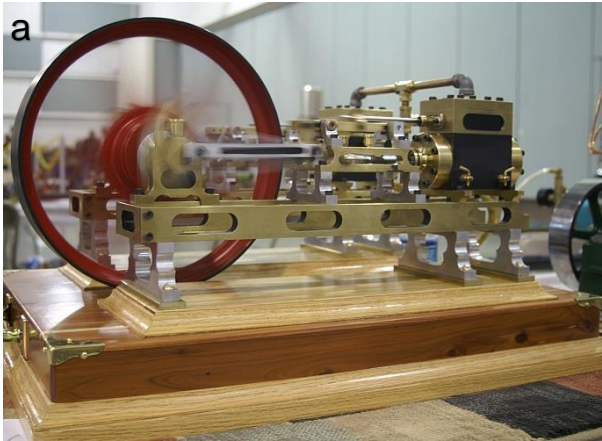


Figura 11a: Motor a vapor didático
 Fonte: Practical Machinist.

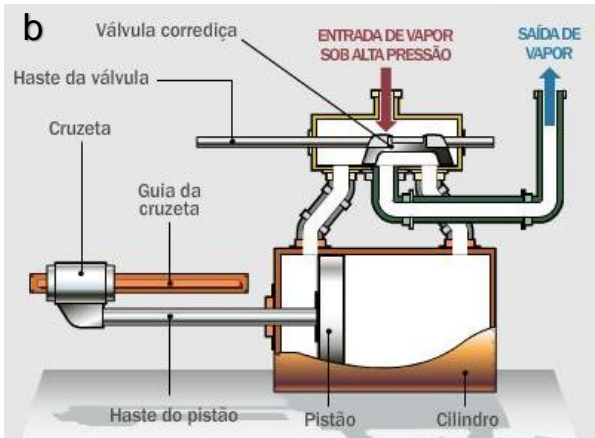


Figura 11b: Funcionamento motor a vapor.

2.2.2.1 Motores Stirling

Atualmente, variadas são as áreas de aplicação de motores Stirling. Devido à constante busca por soluções alternativas de engenharia, que compreendem ainda o uso de fontes renováveis de energia, os avanços associados à tecnologia desse tipo de motor compreendem desde o uso em submarinos militares até o resfriamento de *chips* de computadores. Nas próximas seções, serão apresentados alguns dos principais modelos, aplicações e características principais de motores Stirling comerciais, bem como alguns modelos com aplicações didáticas.

a. Defesa submarina – SAAB Navy Kockums

A empresa sueca *Kockums* desenvolve os chamados AIP (em inglês, *Air Independent Propulsion*). São motores Stirling que auxiliam na propulsão e na geração de energia elétrica de submarinos da frota naval sueca. As figuras 12a e 12b ilustram esse sistema e a operação envolvida, respectivamente. Nota-se que diferentes fluidos de trabalho, como hélio e nitrogênio, são usados no sistema AIP.

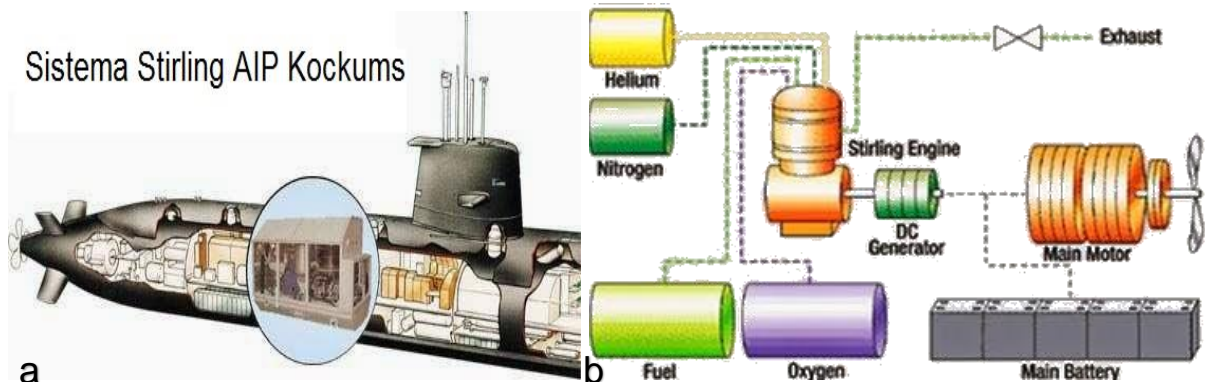


Figura 12a: O sistema Kockums AIP.

Figura 12b: Operação do motor Stirling AIP.

Fonte: Swedish Aeroplane Corporation (2014).

b. Geração de eletricidade e calor – *Cleanergy*

A *Cleanergy* é outra empresa sueca responsável pela geração de energia elétrica a partir da produção de gases de baixo poder calorífico provenientes de aterros sanitários, biogás e tratamento de água, e também a partir da energia solar. Usando motores Stirling (modelo *GasBox 901* para a geração de energia a partir do biogás e modelo *SunBox 111* para geração de energia a partir do sol), donos de aterros conseguem vender energia por 20 anos, obtendo um retorno de investimento em apenas três anos. Ainda, com a energia solar, cada unidade *SunBox 111* consegue gerar 11 kW de potência, além de ser capaz de vender energia limpa a R\$0,30/kWh (€0,06/kWh). As Figuras 13 e 14 contêm ilustrações a respeito do que os motores *Cleanergy* são capazes.

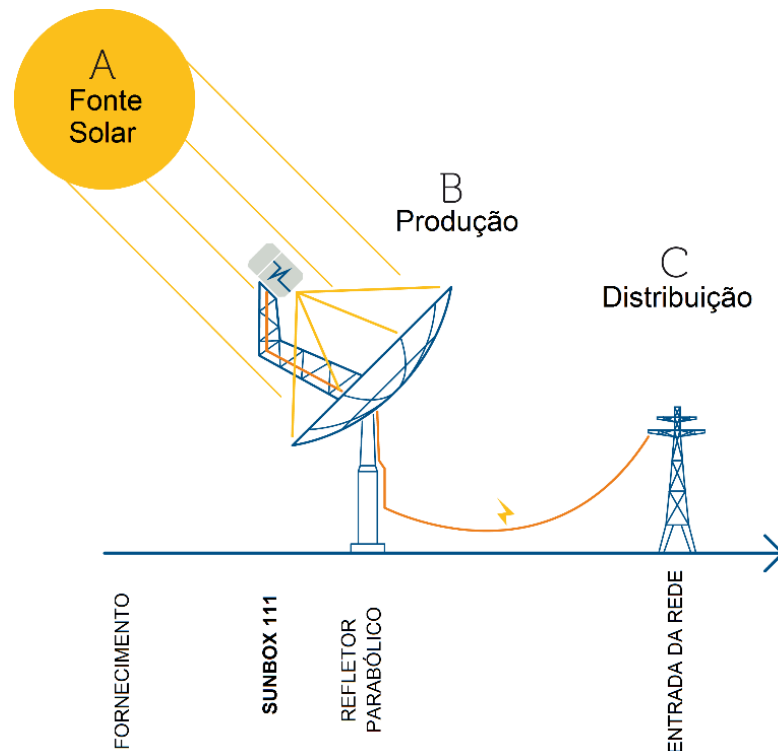


Figura 13: Produção de energia elétrica a partir da energia solar.
 Fonte: Cleanergy (2015).

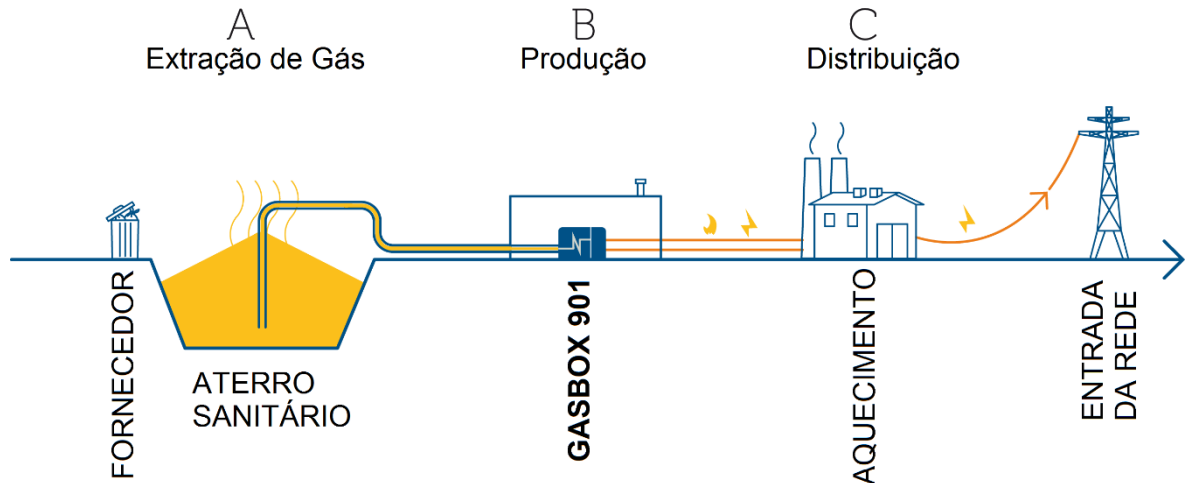
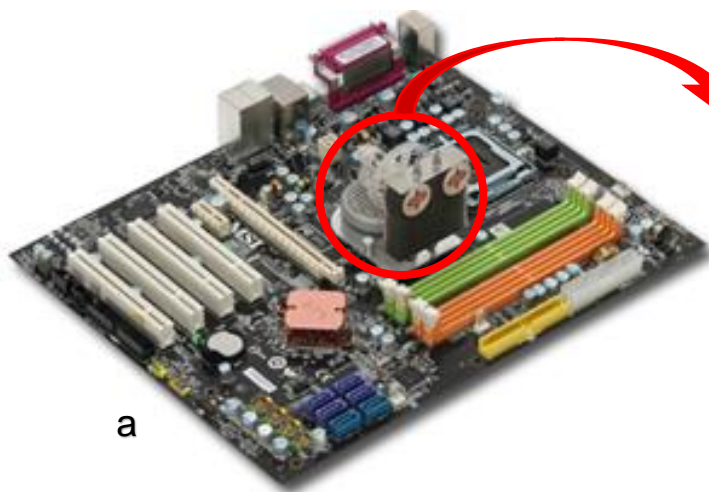


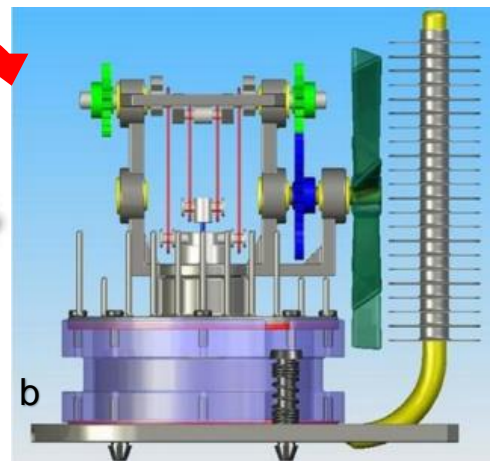
Figura 14: Produção de energia elétrica a partir de gases de aterros sanitários.
 Fonte: Cleanergy (2015).

c. Resfriamento de chips – *Micro-Star Internacional*

A empresa MSI de Taiwan é especializada no desenvolvimento de placas mãe e de vídeo, sendo uma das maiores fabricantes no mundo. Recentemente, a MSI desenvolveu um sistema de arrefecimento da placa mãe através de um motor Stirling tipo *beta*. O motor converte a energia térmica (proveniente do calor do processador) em energia mecânica, acionando um ventilador para o arrefecimento. O motor é projetado para manter a temperatura de operação de 40°C, garantindo a estabilidade e evitando falhas no sistema. Vale ressaltar que, como os motores Stirling necessitam de um tempo para converter a energia, há uma defasagem de tempo entre o aquecimento da placa, a resposta do motor e o conseqüente resfriamento do chip (ver Figuras 15a e 15b).



a



b

Figura 15a: Placa mãe

Figura 15b: Detalhe do motor Stirling beta de resfriamento.

Fonte: EGGERS, (2008).

d. Resfriamento criogênico – *Sunpower Inc.*

É o caso dos motores projetados pela empresa norte-americana *Sunpower*, que desenvolve sistemas de resfriamento criogênico para equipamentos aeroespaciais da NASA. O *Sunpower M77 Cryocooler* resfria os detectores a bordo do satélite RHESSI (*Reuven Ramaty High Energy Solar Spectronoscope Imager*), os mantendo a uma temperatura de -198°C desde 2002, ano de seu lançamento.

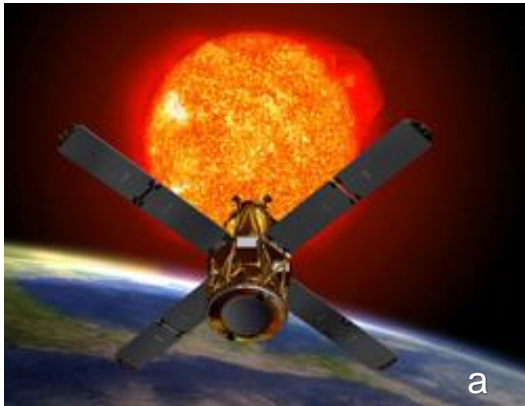


Figura 16a: Satélite RHESSI da NASA **Figura 16b: Motor Sunpower M77.**
Fontes: SUNPOWER INC. (2015).

e. Aquecimento doméstico – *Whispergen*

A empresa neozelandesa *Whispergen* desenvolve um sistema de geração de energia elétrica e térmica através de micromotores Stirling de 750W de potência. O motor é do tipo alfa (Figura 17), com pistões de dupla ação, operando com gás natural, diesel ou querosene, possuindo um sistema de carregamento de baterias.

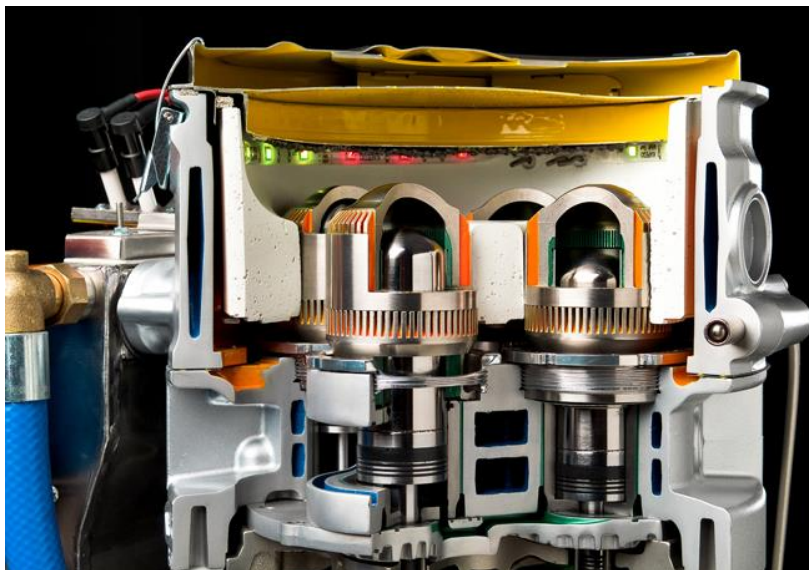







Figura 17: Micromotores Stirling *Whispergen*.
Fonte: WHISPERGEN (2015).

f. Aplicação didática

f.1) *Kontax Stirling Engines*

A empresa *Kontax* da Grã-Bretanha projeta e fabrica motores Stirling de baixa e alta temperatura e motores termo acústicos para as mais diversas (e divertidas) aplicações. Os modelos listados no Quadro 1 são alguns dos tantos fabricados, chamando a atenção por sua qualidade de fabricação. Ainda, para cada modelo, há um manual detalhado para a montagem, bem como relação de materiais e componentes.

	Modelo	Tipo de motor	Configuração	Características	Preço kit/ Montado [€]
	KS90	Baixa Temperatura	-	Funcionam com calor da mão, sol e cubos de gelo; pistão grafitado de baixíssimo atrito; usinagem CNC; aço inox, vidro, borracha e alumínio e latão.	115€/ 128€
	KB09	Alta Temperatura	Gama	Funcionam com álcool desnaturado; mecanismo de feixe; máximo de 2000RPM; aço inox, vidro e alumínio; pistão grafitado	173€/ 186€
	KT09	Alta Temperatura	Termo Acústico	Máximo de 2700RPM, sendo o mais rápido motor do tipo.	*/ 99€
	KS18	Alta Temperatura	Beta	Cilindro de vidro borossilicato, pistão de puro grafite, funcionam com álcool desnaturado; feito à mão.	*/ 367€
	VULCAN	Alta Temperatura	Gama	Funcionam a partir de fogões, de 150 a 450°C; baixa manutenção; alumínio, aço inox e bronze; máximo 450RPM.	*/ 207€

Quadro 1 – Motores Stirling *Kontax*.

Fonte: KONTAX, 2015.

Ainda, a empresa disponibiliza ao cliente, para os mesmos modelos, cores e materiais diferentes, bem como produtos personalizados, como mini caixas de acrílico.

f.2) AstroMedia

Esta empresa alemã fabrica modelos montáveis de papelão para os mais variados equipamentos. Com o propósito educacional (crianças a partir de 14 anos podem montar), eles vendem um kit montável de motor Stirling (Figura 18) que consegue funcionar com uma caneca de água quente. Este kit é composto de cartão perfurado impresso a ouro, peças de alumínio cortadas a laser, eixos, rolamentos de PVC, pistão feito de espuma, manivela de aço e um selo de látex. São necessárias algumas horas para a execução da montagem. O kit custa aproximadamente 30€ (R\$120,00).



Figura 18: Motor Stirling educacional *AstroMedia*
Fonte: ASTROMEDIA (2015).

f.3) Brasil

No Brasil, há algumas opções de motores didáticos que são vendidos já montados. Um vendedor brasileiro disponibiliza um motor capaz de atingir 845 rpm, resfriado à água, e ainda vem acompanhado de um gerador, lanterna led e lamparina:



Figura 19: Motor Stirling caseiro a R\$300,00 (frete não incluso).
Fonte: Manual do Motor Stirling (2015).

2.3 Metodologia de Reprojet

O reprojet de produtos, em linhas gerais, consiste no processo de melhoramento de um produto já desenvolvido. Essa atividade tem uma natureza complexa, pois abrange diversas ferramentas, desde o levantamento das informações do produto existente, identificação de oportunidades de melhorias, até a proposição de mudanças que podem compreender os aspectos funcionais, os princípios de solução, até a configuração e detalhes do produto alvo. (BITENCOURT, 2001)

As melhorias do produto numa atividade de reprojet podem ser relacionadas à inclusão de diferentes características da qualidade, tais como desenvolvimento rápido, custos baixos, facilidade para fabricar e montar, confiabilidade e com reduzido impacto ambiental, sem negligenciar a funcionalidade.

O atendimento destas exigências necessita de uma grande quantidade de informações oriundas de diversas disciplinas, conforme descrito anteriormente na seção 1.5. Essas informações deverão ser consideradas durante todo o processo de reprojet. A grande quantidade e multidisciplinaridade das informações envolvidas é uma das principais justificativas para a sistematização do processo de reprojet, que se dá principalmente pela adoção de metodologias apropriadas.

Uma abordagem de metodologia de reprojet é baseada na engenharia reversa, ilustrada na Figura 20 (OTTO & WOOD, 2000). Essa metodologia é dividida, basicamente, em três fases principais:

1. **Engenharia reversa:** esta fase é composta por etapas que consistem em tratar o produto como uma “caixa-preta”, fazer experimento com os parâmetros de operação, estudar a necessidade dos clientes, prever e fazer hipóteses sobre a funcionalidade do produto, verificar os componentes do produto e seus princípios físicos, realizar experimentos com a funcionalidade e forma do produto atual, incluindo uma desmontagem e uma análise do projeto para manufatura, análise funcional completa e geração das especificações de projeto;
2. **Análise e modelagem:** consiste no desenvolvimento e na execução de modelos, emprego de estratégias de análise, calibração de modelos e experimentos. Nesta fase há o emprego da delimitação do escopo do trabalho (seção 1.4), com o objetivo de identificar oportunidades de melhorias.

3. **Reprojeto:** nesta fase, os autores prescrevem a possibilidade de três níveis de reprojeto: o paramétrico, o adaptativo e o original. A escolha do nível adequado depende dos resultados obtidos nas fases anteriores.

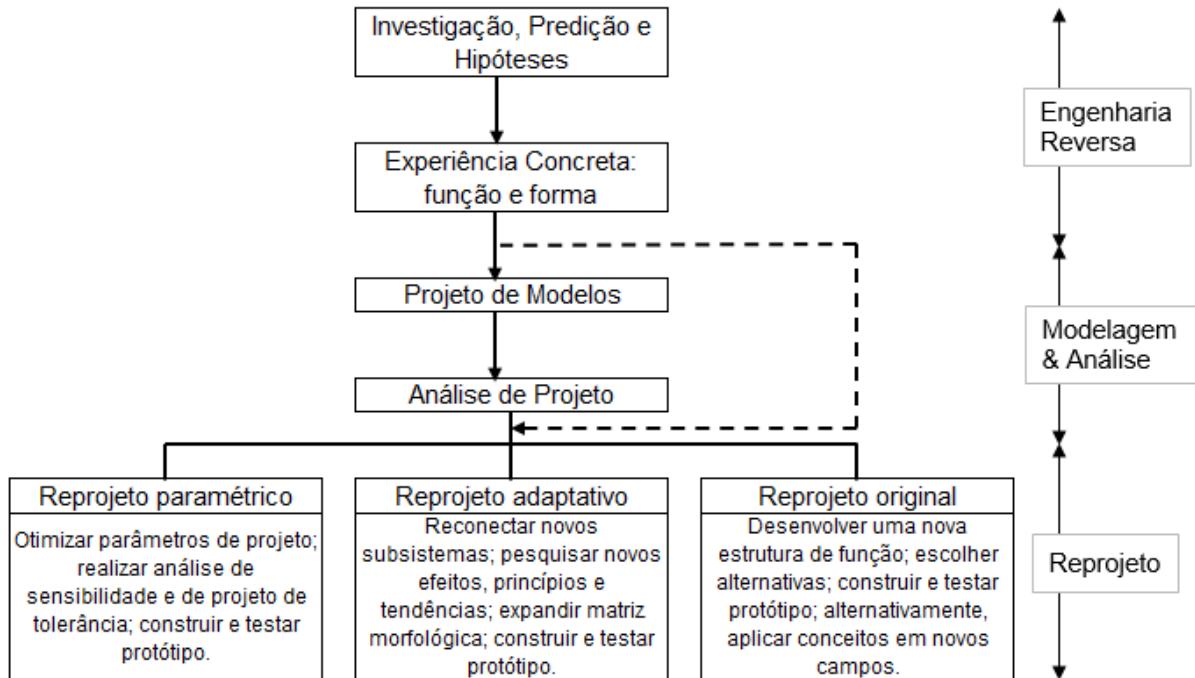


Figura 20: Metodologia de reprojeto geral com base na engenharia reversa.
Fonte: Otto & Wood (2000).

Dufour (1996) define o processo de reprojeto de um produto industrial como “a criação de melhorias em um sistema físico destinado a atender às necessidades do cliente, qualquer que seja ele”. Essa definição pode ser generalizada para o enfoque didático que este trabalho possui, considerando-se o cliente como sendo o estudante de engenharia.

Este autor propõe uma sistematização que consiste numa sequência de fases, desde o levantamento das informações sobre o produto existente até a configuração final do produto modificado, como evidenciando no Quadro 2. Em cada fase são prescritas atividades e recomendações para orientar e auxiliar o projetista.

Salienta-se, desde já, que nem todas as ferramentas de metodologia de reprojeto necessitam ser aplicadas para o atingimento do resultado final. Cabe ao projetista estudar o produto a ser reprojetoado e avaliar quais fases, processos ou ferramentas a serem aplicadas, se encaixam com o objetivo principal do trabalho.

	Fases	Atividades/ Recomendações
1	Base de conhecimento	Seleção das informações referentes à concepção inicial do produto. Recomenda-se ordenar as informações cronologicamente e criar catálogos dos pontos fortes e fracos do produto.
2	Elaboração da nova lista de requisitos	Elaborar a nova lista de requisitos e o estabelecimento das especificações de reprojeto, a partir da base de conhecimento formulada. Utilizar lista de perguntas sobre o produto, análise do ambiente do produto, análise das fases do ciclo de vida do produto e desdobramento da função qualidade.
3	Abstração da estrutura funcional	Estabelecer a nova estrutura funcional do produto, ou seja, formular o problema da maneira mais abstrata possível, para possibilitar a criação de estruturas funcionais variantes. Pode-se utilizar o inverso da síntese funcional.
4	Reprojeto conceitual	Procurar soluções para as estruturas funcionais variantes. É recomendado fazer uso dos métodos que são mais apropriados para a geração de soluções de melhoria, adaptações, tais como: matriz morfológica, análise do valor e mapeamento "AS IS".
5	Reprojeto preliminar	Estabelecer qual das alternativas propostas apresenta a melhor concepção para o reprojeto, mediante um estudo de ordem de grandeza, para determinar quais delas são superiores às outras. Realizar as configurações básicas das variantes. Selecionar a melhor solução por meio da comparação com as outras opções e com o produto existente.
6	Reprojeto detalhado	Determinar a forma definitiva, dimensões, materiais, acabamentos, processos de fabricação, montagem e transporte. Aplicação de ferramentas que ajudam a melhorar o desempenho do produto no atendimento às necessidades, sejam estas novas ou não, tais como: DFM (projeto para manufatura), DFA (projeto para montagem), FMEA (análise do modo e efeito de falha), entre outras.

Quadro 2 – Metodologia de reprojeto de produto.

Fonte: Adaptado de Dufour (1997 p. 31-37).

Analisando essas e outras referências, verifica-se que as metodologias de reprojeto apresentam uma maior preocupação com o levantamento das informações do produto existente a ser melhorado. Para tanto, um mapeamento "AS IS" auxilia, por meio de tabelas, fluxos ou diagramas, no levantamento e documentação da situação atual do produto. Ainda, os problemas e fragilidades são levados em conta, bem como as oportunidades de melhoria do produto.

Como parte da gestão do processo de desenvolvimento de produto (PDP), esse mapeamento pode ser ainda aplicado no processo do reprojeto em si. Rozenfeld et al. (2006) faz em uma divisão relativa aos processos de apoio relacionados ao PDP e fala que "toda vez que surgir um problema ou uma oportunidade de melhoria, deve ser analisado se a melhoria está relacionada com o produto e seu processo de fabricação, ou com o processo de desenvolvimento". Para o primeiro caso (que é o escopo do trabalho), o chamado Gerenciamento de Mudanças de Engenharia (ECM) é acionado. Essa ferramenta, cujo próprio nome diz, irá servir de apoio no gerenciamento de todas as mudanças que ocorrerão no PDP.

Entende-se por mudanças todas as alterações resultantes da atualização das informações do produto, seja em desenhos, especificações de novos materiais, processos de fabricação, entre outros, sendo causadas por otimizações de projeto, processo, detecção de defeitos, adaptação dos produtos a novas condições, redução de custos. (ROZENFELD et al., 2006)

A Figura 21 mostra os diferentes processos de apoio no PDP e a ocasião em que eles são aplicados. Nota-se que o ECM ocorre na fase de pós-desenvolvimento do produto, sendo fundamental para o seu processo de melhoria.

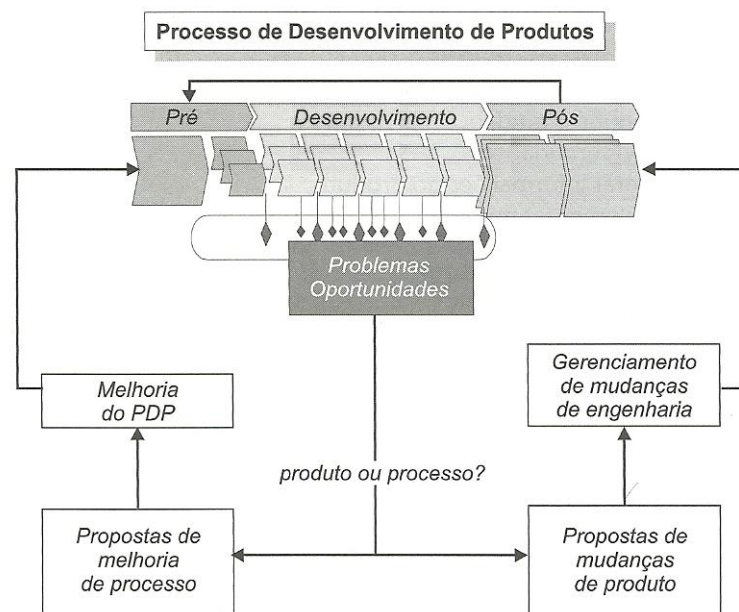


Figura 21: Integração entre o PDP e os processos de apoio.

Fonte: Rozenfeld et al. (2006).

O levantamento da fundamentação teórica sobre a metodologia de reprojeto técnica (aplicação das ferramentas que auxiliem na melhoria do produto) e a metodologia da gestão do processo (sistematização da sequência de todas as fases do processo) é de fundamental importância, servindo de base para o que será prescrito no conteúdo do capítulo 3 a seguir.

Logo, com base no que foi explicado ao longo do capítulo 2, desde os aspectos que envolvem os motores Stirling e outros tipos de motores até os principais conceitos referentes à metodologia de reprojeto, as próximas etapas do trabalho serão fundamentadas no desenvolvimento de um motor Stirling didático, de mesma configuração do modelo reprojeto (gama), para que os resultados finais possam ser comparados da maneira mais justa possível, em termos de custo e desempenho.

3 METODOLOGIA

A metodologia a ser utilizada para servir de base no reprojeto do motor Stirling tipo gama foi fundamentada principalmente nas referências citadas na seção 2.3. A divisão do presente trabalho está e será baseada no que foi prescrito por Dufour, sendo preferencialmente dividida em quatro etapas (Reprojeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado). Os itens anteriormente explicados são de extrema importância para a base do reprojeto informacional (principalmente com o LEA), que engloba alguns pontos das primeiras fases do Quadro 2. Para o projeto conceitual, será realizado um mapeamento “AS IS”. O projeto preliminar contém as principais soluções de melhoria e aponta os aspectos construtivos, e o projeto detalhado contém as características finais do motor, além de mostrar os seus resultados de desempenho.

3.1 Reprojeto Conceitual (Mapeamento “AS IS”)

A parte de análise do motor a ser reprojetoado, dos principais problemas relacionados e do levantamento das principais alternativas de solução são as atividades que englobam o reprojeto conceitual por meio do desenvolvimento de um mapeamento “AS IS”. Sendo uma ferramenta que trará consequências para o resultado final do motor a ser fabricado, essa etapa da metodologia compreenderá, primeiramente, uma análise das características técnicas dos motores práticos (comerciais) e didáticos existentes.

Dessa forma, por meio de tabelas comparativas, a escolha das melhores soluções serão realizadas com base na melhor configuração de motor, nos mais apropriados processos de fabricação, na escolha adequada de materiais e em outras operações que cercam a fabricação do motor Stirling. Vale ressaltar que toda e qualquer decisão na escolha das soluções será tomada em conformidade com o propósito da redução dos custos de fabricação e, em seguida, de alguma melhoria do motor (redução do atrito, aumento da relação potência/ peso).

O fluxograma da Figura 22 ilustra as principais etapas de reprojeto que serão empregadas no presente trabalho. Ele não foi examinado anteriormente para salientar a importância que o mapeamento “AS IS” possui, por contribuir, de certa forma, diretamente com os resultados finais.

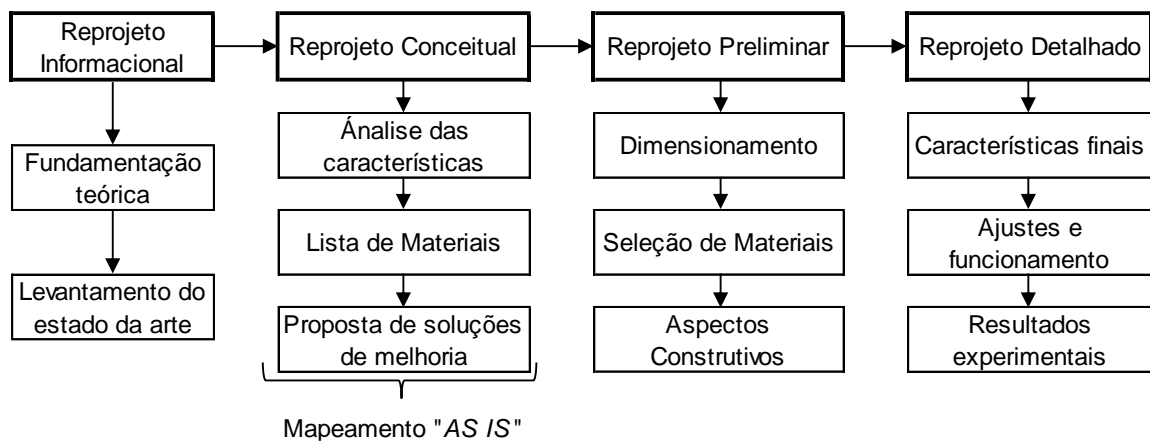


Figura 22: Fluxograma das etapas do reprojeto.

O motor base a ser reprojetoado, fabricado por Pereira (2015), é mostrado na Figura 23. O conhecimento de sua forma construtiva, dos materiais aplicados, do dimensionamento dos componentes, dos processos de fabricação envolvidos e de outras características importantes serão fundamentais para a análise e comparação que o mapeamento descrito propõe e para as próximas etapas do reprojeto.



Figura 23: Motor Stirling tipo gama a ser reprojetoado.

Fonte: Pereira (2015).

Para essa etapa da metodologia, foi necessária realizar uma listagem a respeito das características principais que envolvem os motores Stirling. Com isso, é possível, desde já, ter uma visão mais abrangente dos diferentes tipos de motores Stirling (destacados no LEA). A Tabela 1 cita todas as características inerentes aos motores Stirling e assinala qual delas o motor de Pereira (2015) está inserido. Uma tabela análoga será discutida mais à frente (na parte de resultados) e servirá para a comparar a frequência que essas características são encontradas nos motores Stirling do mercado.

Tabela 1 – Características principais de motores Stirling e o motor de Pereira.

Característica geral	Característica específica	Projeto base
Configuração do motor	Alfa	<input type="checkbox"/>
	Beta	<input type="checkbox"/>
	Gama	<input checked="" type="checkbox"/>
Disposição dos pistões	Vertical	<input type="checkbox"/>
	Horizontal	<input checked="" type="checkbox"/>
Número de pistões de deslocamento	1	<input checked="" type="checkbox"/>
	2 ou mais	<input type="checkbox"/>
Regenerador	Presença	<input type="checkbox"/>
Potência	P < 15W	<input checked="" type="checkbox"/>
	15W < P < 1kW	<input type="checkbox"/>
	P > 1kW	<input type="checkbox"/>
Fonte de energia	Não-renovável	<input checked="" type="checkbox"/>
	Renovável	<input checked="" type="checkbox"/>
Fluido de trabalho	Ar	<input checked="" type="checkbox"/>
	Hidrogênio	<input type="checkbox"/>
	Hélio	<input type="checkbox"/>
Aplicações	Geração energia elétrica	<input checked="" type="checkbox"/>
	Geração energia térmica	<input type="checkbox"/>
	Refrigeração	<input type="checkbox"/>
	Propulsão de veículos	<input type="checkbox"/>
	Iluminação	<input type="checkbox"/>
	Ventilação	<input type="checkbox"/>
	Outros	<input checked="" type="checkbox"/>
Aprendizado	<input checked="" type="checkbox"/>	
Eficiência	> 40%	<input type="checkbox"/>
	< 40%	<input checked="" type="checkbox"/>
Peso	> 1 kg	<input checked="" type="checkbox"/>
	< 1 kg	<input type="checkbox"/>
Número de componentes	> 20	<input checked="" type="checkbox"/>
	< 20	<input type="checkbox"/>
Compactabilidade	> 2 litros (0,002 m ³)	<input checked="" type="checkbox"/>
	< 2 litros (0,002 m ³)	<input type="checkbox"/>
Custo de fabricação	> R\$300,00	<input checked="" type="checkbox"/>
	< R\$300,00	<input type="checkbox"/>

Fonte: Projeto base (dados de Pereira, 2015).

Analisando as características específicas do motor de Pereira, algumas oportunidades de melhoria já podem ser exploradas pelo projetista, como um motor mais compacto e leve ou até mesmo um motor com menor número de componentes.

O Quadro 3 representa a lista de materiais e contempla a segunda parte do mapeamento, atacando os principais problemas associados ao motor de Pereira (2015) e propondo as primeiras alternativas de solução.

Componentes	Material	Quantidade	Processos de fabricação	Possíveis problemas associados	Alternativas de solução
Câmara de deslocamento	Alumínio	1	Fresamento, torneamento.	Desvio de concentricidade à câmara de aquecimento, folga excessiva entre o cilindro e à câmara, peso excessivo.	Melhorar processo de fabricação e dimensionamento, solucionar montagem.
Pistão de potência	Alumínio	1	Fresamento	Tolerâncias de montagem com a câmara de resfriamento e com os anéis de vedação.	Melhorar processo de fabricação
Câmara de aquecimento	Aço inox AISI 304	1	Fresamento, furação.	Atrito elevado, superdimensionado, material.	Escolha de novos materiais, melhorar dimensionamento e processo de fabricação.
Câmara de resfriamento	Al 2014-T7	1	Torneamento, furação, fresamento, rosqueamento.	Atrito elevado, problemas com a transferência de calor (material e aletamento).	Verificação de componentes comerciais, melhorar processo de fabricação, escolha de novos materiais.
Conector das câmaras	Aço	1	Furação.	Volume interno elevado (aumento do volume morto).	Melhorar dimensionamento e posicionamento.
Haste de transmissão do deslocador	Aço	1	Fresamento, torneamento.	Desalinhamento na montagem, peso elevado, folga excessiva entre a haste e a bucha de vedação.	Escolha novos materiais, melhorar dimensionamento.
Haste de transmissão de potência	Alumínio	1	Comercial	Desalinhamento na montagem, peso elevado, tolerância de montagem.	Melhorar dimensionamento e solucionar montagem.
Volante de transmissão	Aço	2	Oxicorte	Desalinhamento na montagem, peso elevado, superdimensionamento.	Escolha de novos materiais, melhorar dimensionamento.
Eixo de transmissão	Alumínio	1	Comercial	Peso elevado	
Virabrequim	Alumínio	1	Comercial	Peso elevado	
Rolamento	Aço	2	Comercial	Atrito elevado	
Bucha de vedação	Bronze grafitado	1	Fresamento, furação.	Má vedação, tolerância de montagem com a haste de transmissão, preço elevado do material.	Verificação de componentes comerciais, melhorar processo de fabricação, escolha de novos materiais.
Anel de vedação O'ring	Composto de borracha	8	Comercial	Má vedação, tamanho incorreto.	Verificação de componentes comerciais, melhorar dimensionamento dos componentes.
Parafusos	Aço	-	Comercial	Superdimensionamento.	
Bases	Aço	4	Fresamento, furação.	Peso elevado	Escolha de novos materiais, melhorar dimensionamento.

Quadro 3 – Lista de Materiais, Problemas e Alternativas de Solução.

Fonte: Adaptado de Pereira (2015).

Percebe-se que, pelo Quadro 3, o mapeamento “AS IS” também busca lançar ideias (“brainstorming”) com as principais alternativas que poderão ser empregadas para a solução dos problemas associados de cada componente. Sucintamente, as principais alternativas de solução são enumeradas abaixo:

g. Melhoria dos processos de fabricação

Essa solução pode melhorar o desempenho geral do motor, levando a uma melhor vedação dos componentes, redução do atrito superficial dos materiais (técnicas mais refinadas de usinagem), melhoria na transferência de calor (por meio de um estudo mais aprofundado do aletamento de superfície, por exemplo).

h. Escolha de novos materiais

A possibilidade de usar produtos comerciais e novos materiais para a fabricação dos componentes do motor poderá aprimorar as características térmicas e dinâmicas de alguns componentes e reduzir os custos de fabricação.

i. Dimensionamento de componentes

A chance de reduzir o peso e tornar o motor mais compacto podem beneficiar a montagem dos componentes (por meio da aplicação de tolerâncias geométricas, por exemplo) e permitindo, ainda, uma possível redução de custos de fabricação. Ainda, poderá melhorar a relação potência/peso.

3.2 Reprojeto Preliminar

Analisando as primeiras alternativas de solução, é possível perceber que, levando em conta o que foi visto no LEA, a proposta de reprojeto para o motor Stirling tipo gama vai ser fundamentalmente baseada no emprego de materiais metálicos e na conseqüente aplicação de processos de fabricação adequados para a definitiva construção e montagem do motor.

Muitos modelos didáticos encontrados apresentam uma forma construtiva bastante simples, com o emprego de materiais alternativos e componentes de uso comum no dia a dia (há um motor Stirling construído que funciona tendo uma lata de refrigerante como um de seus componentes). A grande diferença entre esses tipos de motores didáticos, quando se busca aplicar técnicas mais refinadas de fabricação e componentes mais resistentes, é a durabilidade e até mesmo a confiabilidade que se deseja alcançar (com o prolongamento do tempo de operação, por exemplo).

A partir dessa premissa e baseando-se no fundo didático que o presente trabalho se compromete, o reprojeto preliminar vai buscar propor soluções que possibilitem obter um motor durável e confiável, que ele possa ser estudado ao longo do tempo e que o máximo de conclusões possam ser obtidas a partir de seus resultados no final.

Com isso, levando em consideração os principais objetivos do trabalho e das duas primeiras etapas do reprojeto salientadas anteriormente, o reprojeto preliminar consistirá, com o uso de cálculos, estimativas e, também, de uma teoria aplicada ao motor Stirling (Teoria de Schmidt – APÊNDICE B), na primeira concepção do dimensionamento correto dos principais componentes, na escolha adequada dos materiais e em algumas propostas de soluções de melhoria a partir do detalhamento dos principais aspectos construtivos e custos envolvidos.

3.2.1 Dimensionamento

3.2.1.1 Considerações iniciais

Para o início do dimensionamento dos principais componentes do motor Stirling a ser reprojetoado e baseando-se nos principais valores de dimensionamento do projeto base, serão levados em consideração os seguintes elementos:

- a. Por se tratar de um motor didático e para reduzir seu peso e os custos com materiais, o volume do motor (considerando o espaço ocupado por um paralelepípedo) será menor que 2 litros ($0,002 \text{ m}^3$);
- b. Levando em conta as características dimensionais dos motores tipo gama didáticos listados e observados e principalmente o motor a ser reprojetoado, serão adotados valores de referência para os principais componentes (diâmetros, cursos dos pistões, comprimentos);
- c. Para efeito de análise e verificação, os parâmetros dimensionais serão usados para calcular, por meio da teoria de Schmidt, os principais valores teóricos (como potência e velocidade) e compará-los, ao final deste trabalho, com os valores experimentais obtidos por meio do funcionamento do motor.

Assim, seguindo as principais referências e analisando alguns projetos, como o de Ross (2011), que descreve os procedimentos para o desenvolvimento e melhoria

de motores Stirling, os parâmetros dimensionais a serem aplicados poderão seguir uma forma mais criteriosa. Nas próximas seções, alguns pontos chaves para essa etapa serão evidenciados com base na literatura consultada.

3.2.1.1 Parâmetros dimensionais

Seguindo o que foi salientado a partir das referências da seção 2.1.5, se buscará uma distância reduzida entre as câmaras de aquecimento e resfriamento. Ainda, considerando o volume máximo delimitado de $0,002\text{m}^3$, alguns diâmetros e comprimentos serão baseados a partir de um modelo didático encontrado (PARIS, 2012). Salienta-se aqui que o propósito da redução de custos será alcançado principalmente por meio da escolha adequada de materiais, aspectos construtivos e processos de fabricação (a serem explanados nas próximas seções), deixando o dimensionamento em si em segundo plano.

Dessa forma, a Tabela 2 contém os valores dos principais parâmetros dimensionais de entrada a serem computados pela teoria de Schmidt e a Figura 24 os evidencia por meio de uma ilustração.

Tabela 2 – Parâmetros dimensionais de entrada

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor de referência	Unidade
Diâmetro do pistão deslocador	D_d	16,0	mm
Folga radial entre pistão deslocador e a câmara de deslocamento	f	0,25	mm
Comprimento da câmara de deslocamento	L	38,0	mm
Curso do pistão deslocador	C_d	16,0	mm
Diâmetro do conector das câmaras	D_c	3,0	mm
Comprimento do conector	C_c	30,6	mm
Diâmetro do pistão de potência	D_p	12,5	mm
Comprimento do pistão de potência	C_p	25,0	mm

Fonte: Adaptado de Paris (2012).

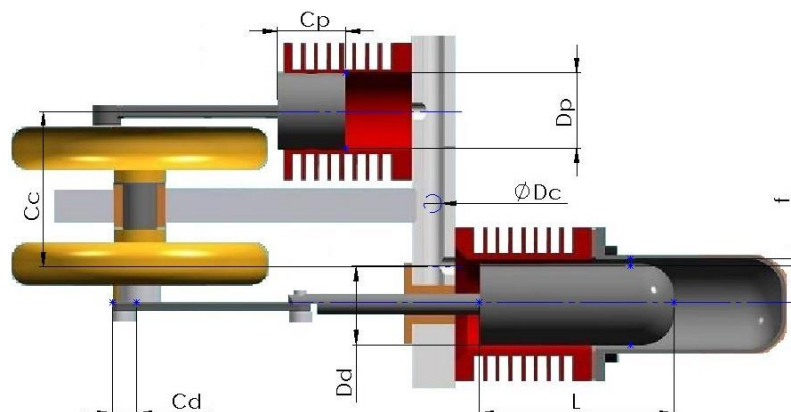


Figura 24: Ilustração dos parâmetros dimensionais de entrada

3.2.1.2 *Análise da Teoria de Schmidt*

Assim, por meio do teorema de Schmidt (Apêndice A), esses valores serão utilizados para calcular os principais volumes internos e, juntamente com outros parâmetros de entrada, como temperatura da fonte quente (400°C) e fria (30°C) e uma estimativa da rotação (250rpm), valores teóricos de saída serão calculados, como potência, pressão máxima do motor, diâmetro do disco de inércia, trabalho e eficiência.

Ao final, alguns desses valores serão comparados com os valores experimentais a serem obtidos com o funcionamento do motor, como potência e rotação. Os cálculos dos valores teóricos de saída, assim como a plotagem do ciclo Stirling podem ser conferidos por meio de uma ilustração (Figura 48) também no Apêndice A.

A Tabela 3 reúne os valores de saída calculados com a ajuda dos parâmetros dimensionais descritos e das informações contidas na Teoria de Schmidt:

Tabela 3 – Parâmetros dimensionais de saída

Parâmetro de saída	Valor teórico	Unidade
Temperatura da fonte quente (valor de entrada)	400	°C
Temperatura da fonte fria (valor de entrada)	30	°C
Velocidade máxima (valor de entrada estimado)	250	rpm
Diâmetro do disco de inércia	35	mm
Potência do motor	0,022	W
Pressão máxima do motor	147	kPa
Trabalho	0,01	J
Eficiência	57,1	%

Ao final, no capítulo 4, a mesma tabela será apresentada listando também os valores experimentais obtidos com o funcionamento do motor.

A Figura 25 ilustra a primeira concepção do motor Stirling tipo gama proposta. Os aspectos construtivos do motor serão detalhados para explicitar a montagem dos componentes e os principais efeitos que serão gerados no funcionamento e custo de fabricação a partir desses aspectos. Os desenhos de fabricação de cada componente e a montagem do motor podem ser encontradas no Apêndice D.

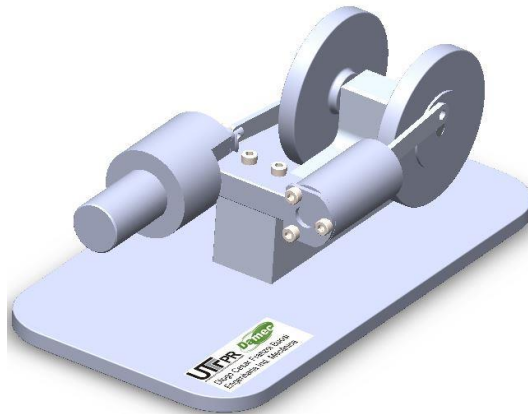


Figura 25: Modelagem esquemática do motor.

3.2.2 Seleção de Materiais

A escolha correta dos materiais permite, juntamente com prévio e adequado dimensionamento dos componentes, a redução do peso total do motor, melhores tolerâncias geométricas (a partir da aplicação de um processo de fabricação adequado), melhorias nas trocas térmicas (devido às características de condutividade térmica do material), aumento da vida útil do motor e também na redução dos custos do projeto.

3.2.2.1 *Vedação na câmara de deslocamento e na haste de transmissão*

Nas literaturas pesquisadas, um problema difícil de ser solucionado nos motores Stirling é a vedação na câmara de deslocamento e na haste de transmissão, pois se trata de um formato de vedação longitudinal. Aliado a isso, outro problema presente é o atrito, que deve ser o mais baixo possível para garantir um movimento mais suave desses e outros componentes. A característica do material terá influência tanto na vedação quanto na redução do atrito.

Dessa forma, considerando que a maioria dos componentes será de alumínio, por ser fácil de usinar, não é indicado utilizar uma câmara e eixo de mesmo material, principalmente para as regiões citadas. Ao longo do tempo, o atrito devido ao movimento do conjunto pode gerar desgaste por abrasão e ocasionar problemas de vedação, reduzindo o desempenho do motor.

Por esse motivo, a haste de transmissão da câmara de deslocamento não será produzida em alumínio e sim de aço retificado, e para o pistão de potência, anéis *O'ring* (composto de borracha) serão usados para evitar o contato direto deste com a câmara de resfriamento, garantindo a máxima vedação e reduzindo o atrito.

No projeto de Pereira (2015), empregou-se, para a redução do atrito e problemas de vedação, uma bucha de bronze grafitado, devido à sua característica auto lubrificante, para a região da câmara de deslocamento que engloba a haste de transmissão. É um componente relativamente caro, mas que possui uma resistência mecânica superior à uma parede de alumínio, considerando o desgaste excessivo com o uso ao longo do tempo. Dessa forma, para não elevar tanto os custos com material, optou-se por não utilizar nenhuma bucha de bronze grafitado em um primeiro momento. Com base nesses princípios, as melhores opções de materiais para cada componente são reunidas no Quadro 4, que ainda conta com um orçamento prévio de quanto será gasto em material no total. As escolhas dos principais materiais são realizadas principalmente com base nos custos a serem despendidos e, também, na necessidade geométrica, mecânica e térmica de cada componente do motor.

Três opções foram levantadas para a escolha de material de cada componente:

- 1ª. A primeira opção se baseia na alternativa mais leve de motor, com o alumínio sendo muito utilizado;
- 2ª. A segunda opção se diferencia da primeira ao trazer componentes de ferro fundido (aplicado no pistão de potência e haste de transmissão do deslocador), que possui a característica auto lubrificante e boa capacidade de transferência de calor;
- 3ª. Já a terceira opção se fundamenta na escolha de ferro fundido para as câmaras de aquecimento e resfriamento, já que possui maior condutividade térmica em relação ao aço, o que a princípio ajudaria na maior diferença de temperatura entre as câmaras.

Foram consultadas empresas que trabalham com materiais reciclados na região de Curitiba e disponibilizam os materiais listados no Quadro 4. O custo médio orçado de cada material foi calculado baseando-se na média dos valores de cada lugar. O peso de cada componente foi estimado utilizando o software SolidWorks 2015, que consegue calcular o peso do componente modelado quando se define um material. O peso aproximado de material a ser comprado foi calculado considerando 175% do peso de cada componente, para que sobre material em um eventual erro de fabricação. Alguns materiais só podem ser comprados com uma quantidade mínima, como é o caso do eixo de aço retificado que só é comercializado em tarugos de 1000mm de comprimento.

Componente	Necessidade mecânica/ térmica	Material	Peso aproximado componente [kgf]	Peso aproximado de material [kgf]	Custo médio orçado [R\$/kgf]	Custo aproximado [R\$]	Opção	Opção 1	Opção 2	Opção 3
Câmara de aquecimento	Maior condutibilidade térmica possível	Ferro fundido	0,013	0,023	10	0,22	A-1			X
		Aço 1020	0,015	0,026	7	0,18	A-2	X	X	
Câmara de deslocamento	Boa condutibilidade térmica e usinabilidade devido à superfície aletada que garante melhores trocas térmicas.	Alumínio	0,05	0,088	30	2,625	B-1	X	X	
		Ferro fundido	0,0875	0,153	15	2,29	B-2			X
Pistão deslocador	Baixa densidade para facilitar a movimentação.	Alumínio	0,02	0,035	22	0,77	C-1	X	X	X
Pistão de potência	Boa usinabilidade e que garanta boa tolerância geométrica de encaixe.	Alumínio	0,004	0,007	22	0,15	D-1	X		
		Ferro fundido	0,012	0,021	10	0,21	D-2		X	X
Câmara de resfriamento	Boa condutibilidade térmica e usinabilidade (superfície aletada), e que garanta melhor tolerância geométrica possível.	Alumínio	0,04	0,070	22	1,54	E-1	X		
		Ferro fundido	0,07	0,123	10	1,22	E-2		X	X
Conector das câmaras	Boa usinabilidade e que garanta boa tolerância geométrica de montagem.	Alumínio	0,01	0,018	22	0,38	F-1	X	X	
		Aço 1020	0,02	0,035	7	0,24	F-2			X
Haste de transmissão do deslocador	Superfície com baixo atrito e que garanta boa tolerância geométrica de encaixe.	Aço retificado	0,006	0,011	25	25	G-1	X	X	X
Bielas	Baixa densidade.	Alumínio	0,003	0,005	22	0,11	H-1	X	X	X
Volantes de transmissão	Baixa densidade.	Alumínio	0,1	0,175	30	5,25	I-1	X	X	X
Eixo de transmissão	Baixa densidade.	Alumínio	0,0025	0,004	22	0,09	J-1	X	X	X
Suporte do motor	Baixa densidade.	Alumínio	0,13	0,228	50	11,37	K-1	X	X	X
Base	Baixa densidade	Alumínio	0,18	0,315	60	18,9	L-1	X	X	
		Ferro fundido	0,48	0,840	15	12,6	L-2			X

Quadro 4 - Lista de Opções de Materiais e Orçamentos (sem mão de obra).

O gráfico da Figura 26 traz um comparativo entre o peso total do motor e o custo estimado com base na escolha de materiais para cada opção caracterizada no Quadro 4. Percebe-se que não houve uma diferença tão grande de custo entre as opções devido ao tamanho reduzido dos componentes. Logo, a escolha dos materiais pode ocorrer mormente com base nas suas características térmicas e mecânicas.

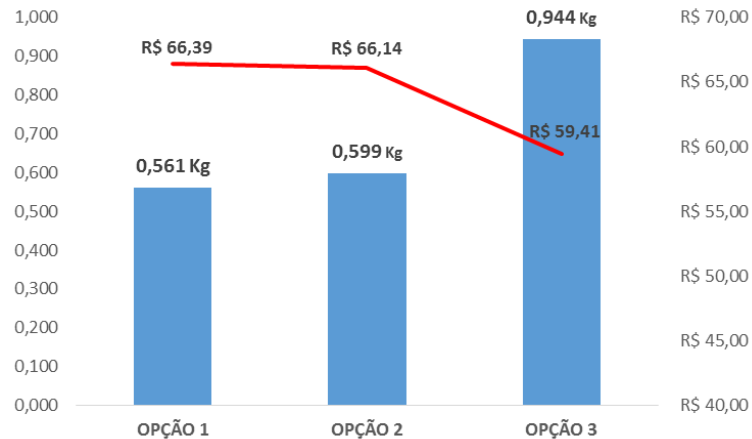


Figura 26: Comparativo de peso e custo das três opções de materiais.

3.2.3 Aspectos Construtivos

Somando-se ao dimensionamento e à escolha dos materiais para cada componente, outros aspectos importantes da construção do motor serão detalhados nesta seção. Aqui, propostas de melhorias serão dadas aos componentes mais importantes do motor, levando em conta os principais problemas encontrados no projeto de Pereira (2015), e, aliando a esse fator, a continuação da busca pela redução de custos por meio de análises de viabilidade e considerações que não afetem o desempenho geral do motor Stirling.

Como mencionado anteriormente, os problemas mais decorrentes associados ao motor Stirling, como a falta de vedação e atrito elevado, podem também ser atenuados com melhorias no alinhamento de montagem dos componentes, com técnicas alternativas de montagem ou, até mesmo, na definição correta das tolerâncias geométricas de montagem.

Ainda, no que se refere ao principal objetivo do trabalho, a redução de custos pode também ser obtida com a otimização do número de componentes (comerciais ou não) através de uma solução que possa trazer simplicidade ao projeto.

Dessa forma, as principais propostas de melhorias para o reprojeto do motor Stirling e os aspectos construtivos mais importantes são definidos e detalhados nas

próximas seções. Resumidamente, algumas propostas foram focadas no corpo do motor e componentes móveis, com o objetivo de atenuar os efeitos da má vedação e do atrito elevado. Outras propostas foram desdobradas para reduzir diretamente o custo de fabricação e uma análise de viabilidade (Apêndice B) foi estruturada para determinar se o aletamento da superfície de alguns componentes do motor justifique o custo associado de fabricação.

3.2.3.1 *Corpo Principal do Motor*

Algumas características construtivas usuais para os motores Stirling tipo gama são encontradas com menor ou maior frequência, analisando os modelos de mercado. Uma delas é a disposição entre as câmaras de deslocamento e resfriamento.

Entende-se por corpo principal do motor a união das câmaras de deslocamento e resfriamento e o conector de ligação dessas câmaras. A forma como esses componentes serão unidos entra em discussão, pelo nível de importância desse conjunto e pelo fato de que o ar de trabalho não deve escapar das fronteiras abertas devido à falta de vedação ocasionada por uma falha de montagem.

O motor base do presente reprojeto apresenta uma forma de união bem peculiar entre as câmaras de deslocamento e resfriamento, se comparada com os motores vistos no LEA. Analisando o projeto de Pereira (2015), as duas câmaras se encontram unidas por um conector de dimensão bem reduzida e dois anéis O'ring. O autor argumenta que isso traria vantagens para a eficiência, uma vez que o volume morto seria reduzido pelo encurtamento do conector das câmaras, além de poder trazer algum benefício para a fabricação do conjunto em si.

Acredita-se que este tipo de junção entre as câmaras, ilustrada na Figura 27, não traga benefícios térmicos para o desempenho do motor, uma vez que a câmara de resfriamento se encontra muito próxima da câmara de aquecimento (devido às menores dimensões dos componentes) e dessa forma a diferença de temperaturas não seria tão grande. Além disso, a superfície externa de troca térmica da câmara de resfriamento não é levada ao máximo, já que parte dela está em contato com a parede da câmara de deslocamento.

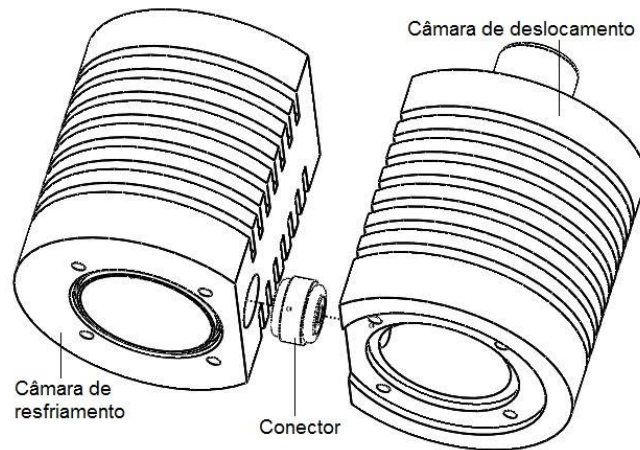


Figura 27: Corpo do motor de Pereira (2015).

Assim, considerando o tamanho reduzido do motor a ser reprojetoado em comparação com o motor de Pereira, o formato de montagem entre essas câmaras em questão será com um conector de maior comprimento. Logo, três alternativas de solução foram examinadas para o arranjo construtivo do corpo do motor.

A primeira alternativa se baseia na fabricação de um corpo com solda para os componentes citados (câmaras e conector). Acredita-se que neste formato, a vedação seria perfeita, visto que não haveria componentes de conexão, como parafusos e anéis de vedação, e alguns processos de fabricação poderiam ser economizados. Em contrapartida, a técnica de usinagem deste corpo único deve ser mais refinada (utilizando solda em alguns locais), visto que vários procedimentos devem ser executados, aumentando o tempo de fabricação, de modo a garantir os dimensionamentos aplicados. A Figura 28 ilustra a primeira alternativa.

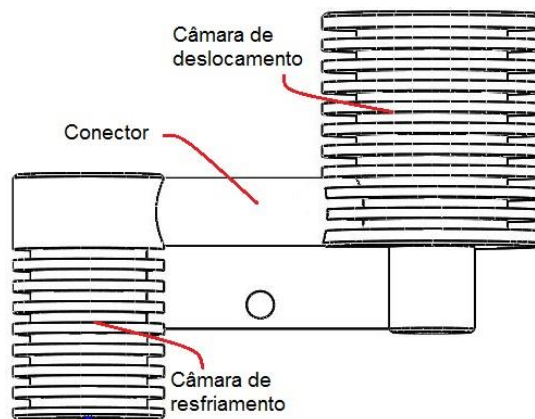


Figura 28: Primeira alternativa de corpo de motor.

A segunda alternativa difere da primeira propondo a fabricação separada desses componentes, e o conector seria um eixo roscado nas suas extremidades ligando as duas câmaras. Um detalhe a ser considerado é que, ao rosquear o conector

nas câmaras, é possível haver perda de vedação do conjunto, acarretando perda de potência (ver Figura 29).

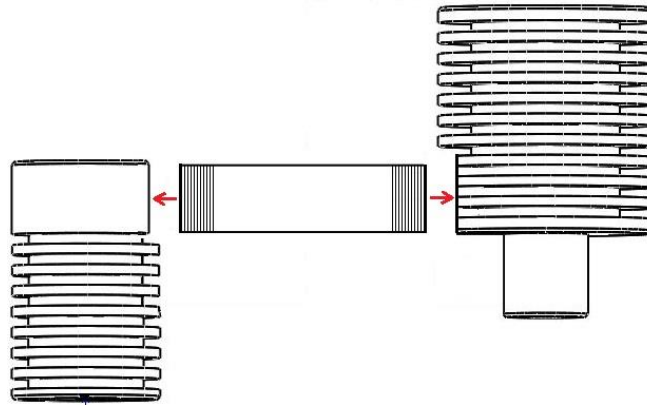


Figura 29: Segunda alternativa de corpo de motor.

A terceira alternativa difere da segunda ao propor um conector não cilíndrico. A união do conector e as câmaras seria feita com parafusos, e anéis O'ring seriam usados para vedar os pontos de conexão (embora aumente um pouco os custos). Uma vantagem neste tipo de conector é poder garantir um melhor alinhamento de montagem para o conjunto do corpo do motor (ver Figura 30).

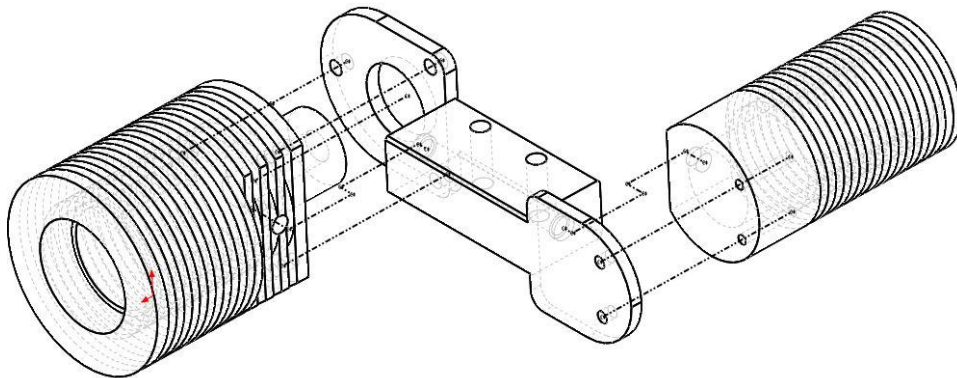


Figura 30: Terceira alternativa de corpo de motor.

3.2.3.2 Partes Móveis

Para que o motor possa funcionar de maneira mais eficiente, algumas técnicas podem ser aplicadas, como alívio de peso e redução do atrito das partes móveis. O dimensionamento e as características de superfície do pistão deslocador e a sua haste de transmissão, juntamente com o pistão de potência e o conjunto de transmissão, possuem papel fundamental na garantia deste quesito. Resta saber se as técnicas de fabricação e a decisão de adicionar ou não componentes comerciais trarão um efeito positivo no desempenho do motor a ponto de compensar o custo associado.

A presença, em motores vistos, de alívio de peso no pistão deslocador é interessante, visto que o custo da hora-máquina para a furação do pistão não é tão elevado. A contrapartida é a adição de uma tampa na extremidade furada do pistão, o que envolveria um adicional no custo da fabricação do componente. Levando em conta que o pistão será de alumínio (portanto a diferença de peso não seria tão grande), a decisão do alívio de peso neste componente deve ser bem pensada.

A opção para a haste de transmissão do pistão deslocador como sendo a utilização de um eixo de aço retificado comercial de dimensão definida (ao invés de usinar uma barra de ferro fundido ou aço e trabalhar a superfície do componente) é levada em conta, pois possui uma boa tolerância dimensional (de 0,005 a 0,01 mm) e superfície com reduzida rugosidade superficial.

Para os pontos de conexão das bielas, que ligam os pistões aos dois volantes de transmissão, foram estudadas duas soluções. A primeira consiste na adição de buchas de nylon (leves e com superfície lisa) ligando as bielas aos volantes e deve funcionar bem caso o conjunto esteja devidamente alinhado. Caso haja algum problema de alinhamento de montagem entre os eixos dos pistões, a segunda alternativa prevê a utilização de pequenos rolamentos comerciais em todos os pontos de conexão das bielas, uma opção mais cara, mas que garantiria uma considerável redução de atrito. A Figura 31 ilustra as partes móveis do motor.

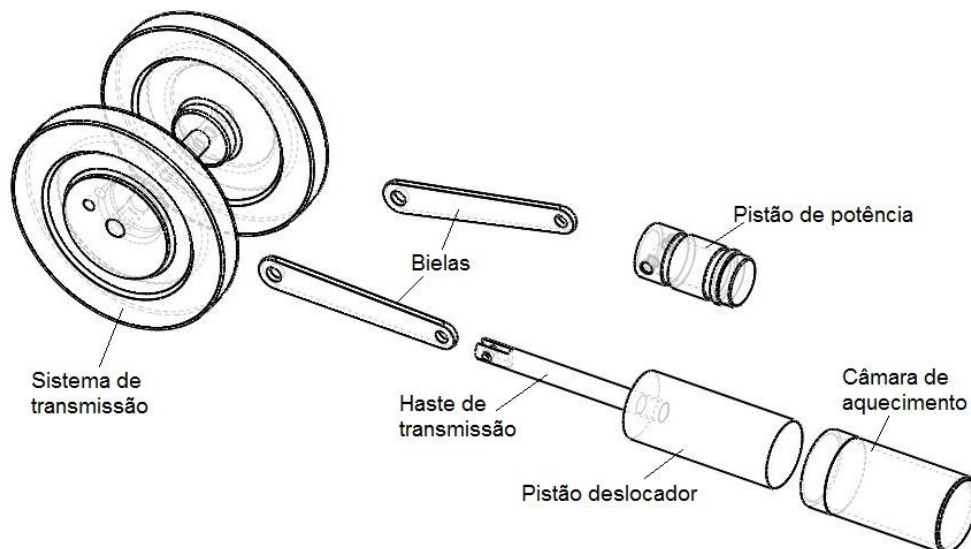


Figura 31: Partes móveis do motor.

3.2.3.3 Ajuste por Interferência

Para reduzir o custo com alguns componentes comerciais, como parafusos, arruelas e porcas (e conseqüentemente gastos com outros processos de fabricação, como o rosqueamento), sugere-se como alternativa de montagem a aplicação de ajustes com interferência, em outras partes do motor, que não são vistos usualmente. É o caso da montagem da câmara de aquecimento e a câmara de deslocamento, que será realizada a partir da ajuda de uma morsa ou martelo, garantindo a máxima vedação. Os dois volantes de transmissão também serão conectados por um eixo por ajuste com interferência. Ambas as montagens podem ser visualizadas na Figura 32.

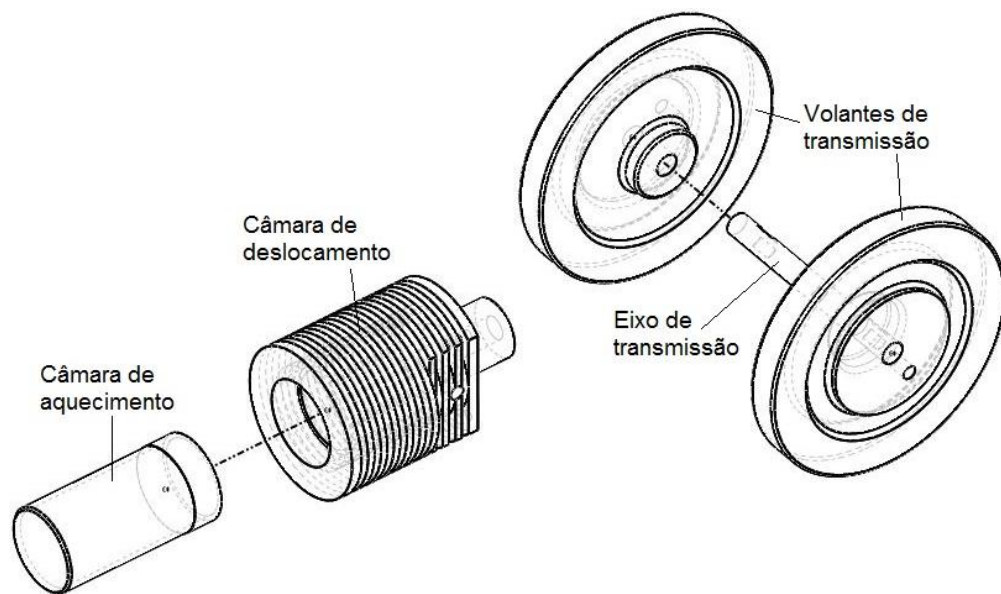


Figura 32: Partes montadas com ajuste por interferência.

3.2.3.4 Tolerâncias geométricas e de montagem

Analisando a NBR 6409 de tolerâncias geométricas e tolerâncias dimensionais para furos e eixos (ABNT), verifica-se que o uso de tolerâncias é essencial para alguns componentes do motor. O dimensionamento, alinhamento e posicionamento dos componentes são quesitos que podem ser melhorados com a aplicação adequada de tolerâncias geométricas, trazendo benefícios para a fabricação e montagem, repercutindo positivamente no desempenho geral do motor.

Dessa forma, dentro das alternativas de solução para cada componente do motor, busca-se aplicar tolerâncias geométricas nas regiões mais críticas do motor, como o paralelismo entre faces do conector e faces do suporte do motor, posição de furos, além das tolerâncias de ajustes para os furos e eixos (ajustes para as câmaras

e pistões, para o furo da câmara de deslocamento e haste de transmissão e para os componentes montados por interferência).

É possível aplicar tolerâncias de montagem, principalmente, no que se refere às tolerâncias entre eixos e câmaras (para a haste e pistão deslocador em relação à câmara; para a câmara de aquecimento em relação à câmara de deslocamento; para o pistão de potência em relação à câmara de resfriamento). A Tabela 4 fornece algumas tolerâncias geométricas e de montagem a serem aplicadas como referência. Todas as tolerâncias podem ser visualizadas nos desenhos de fabricação contidos no APÊNDICE D.

Tabela 4 – Tolerâncias geométricas e de montagem.

Componente/ submontagem	Região/ Ajuste	Tipo Tolerância	Símbolo	Valor [mm]
Câmara de deslocamento	Furo lateral	Geométrica (Posição)	\oplus	$\pm 0,15$
Câmara de resfriamento	Furo lateral	Geométrica (Posição)	\oplus	$\pm 0,15$
Conector	Faces adjacentes às câmaras	Geométrica (Paralelismo)	//	0,1
Conector	Furos do conector	Geométrica (Posição)	\oplus	$\pm 0,15$
Pistão deslocador e haste de transmissão	Ajuste de furo e eixo	Montagem (interferente)	-	H7/r6
Câmara de deslocamento e haste de transmissão	Ajuste de furo e eixo	Montagem (deslizante)	-	H6/h6
Câmara de deslocamento e de aquecimento	Ajuste de furo e eixo	Montagem (interferente)	-	H7/r6
Pistão de potência e câmara de resfriamento	Ajuste de furo e eixo	Montagem (folga)	-	H6/h6
Volantes e eixo de transmissão	Ajuste de furos e eixo	Montagem (interferente)	-	H7/r6

Vale lembrar que, dependendo do valor de tolerância que se quer aplicar em um componente ou montagem, isso irá influir diretamente na escolha do processo de fabricação. Por exemplo, tolerâncias mais estreitas (0,005 a 0,01mm a cada 100mm) geralmente são obtidas pelo processo de retificação, o que eleva o custo final do projeto.

3.2.3.5 Aletamento de superfície

Um dos principais fatores que influem diretamente na potência de saída do motor é a diferença de temperaturas entre a parte fria e quente do motor Stirling, que pode ser aumentada significativamente por meio da utilização de aletas nas câmaras de deslocamento e resfriamento.

Segundo Incropera; Dewitt et al. (2008), superfícies aletadas são usadas para aumentar a transferência em uma superfície através do aumento da área superficial efetiva. Contudo, a aleta em si representa uma resistência adicional à transferência de calor condutiva na superfície original. Devido a isso, não existe qualquer garantia de que a taxa de transferência de calor será aumentada com o uso de aletas.

Entretanto, é possível estimar o aumento na transferência de calor proporcionado pela instalação de aletas na superfície de troca de calor através do cálculo da chamada efetividade de aleta ϵ_a , definida pela razão entre a taxa de transferência de calor calculada com a presença de aletas e a taxa de transferência de calor sem aletas.

Ainda de acordo com Incropera; Dewitt et al. (2008), o uso de aletas dificilmente se justifica caso ϵ_a seja menor que 2, uma vez que o custo envolvido na fabricação de aletas geralmente é elevado. Também por esse motivo, opta-se com frequência por materiais que apresentem boa condutividade térmica e baixo custo na fabricação das aletas, como ligas de alumínio.

Tendo vista a importância da redução de custos definida nos objetivos do presente projeto, evitou-se qualquer aumento injustificado nos custos de fabricação. Dessa forma, consideraram-se todos os fatores acima expostos em uma análise de viabilidade do aletamento das superfícies de troca de calor.

As equações referentes aos cálculos de transferência de calor utilizadas para a análise de viabilidade podem ser conferidas no Apêndice B.

3.2.3.6 Relação Custo-Benefício

As principais propostas e alternativas do reprojeto preliminar para o corpo do motor, partes móveis e pontos de conexão, tolerâncias aplicadas e a análise de viabilidade, evidenciados através dos tópicos anteriores, são reunidos no Quadro 5. Cada proposta enumera seus benefícios (também no que se refere à redução de custo) para o funcionamento e desempenho do motor, bem como os custos mais evidentes associados para cada proposta.

Tipo	Proposta	Benefícios/ redução de custo	Custos associados
Corpo do Motor	Corpo de motor soldado.	Vedação máxima e economia com buchas de vedação e processos de fabricação.	Solda em alumínio: R\$20,00. Mão-de-obra especializada/ processos de fabricação: R\$200,00
Corpo do Motor	Componentes separados com conector não cilíndrico.	Melhor alinhamento de montagem das câmaras através do conector.	Fabricação do conector: R\$50,00 2 Parafusos Allen: R\$1,00
Partes Móveis	Alívio de peso no pistão deslocador.	Melhoria na potência de saída do motor.	Furação: R\$15,00 Fabricação de tampa: R\$15,00
Partes Móveis	Uso de rolamentos comerciais	Redução de atrito, melhorando a potência de saída.	4 rolamentos comerciais: R\$6,00
Partes Móveis	Haste de transmissão de aço retificado e bucha de bronze grafitado	Tolerância geométrica elevada e bom acabamento superficial.	Valor do tarugo da haste: R\$25,00 Bucha: R\$30,00
		Redução de custo: R\$100,00 com a fabricação da haste (torneamento + retificação)	
Ajuste por interferência	Montagem das câmaras de aquecimento e deslocamento e sistema de transmissão por interferência	Redução de componentes comerciais, como parafusos e arruelas, bem como a economia com furação e rosqueamento.	Sem custos extras associados.
		Redução de custo: - 6 Parafusos Allen: R\$2,00 - Fabricação: R\$30,00	
Tolerância Geométrica	Retificação da parede interna da câmara de deslocamento	Redução de atrito com a haste de transmissão e pistão	Retificação: R\$80,00
Aletamento de superfície	Aletar a câmara de resfriamento e deslocamento	Possível melhoria nas trocas térmicas e aumento de ΔT entre as câmaras	Torneamento das aletas: R\$67,00

Quadro 5 – Lista de propostas, economias e custos associados.

Todos os custos de fabricação foram estimados por meio do cálculo dos tempos de usinagem de cada componente (ver Apêndice C), com base no custo da hora-máquina de oficinas mecânicas (tornearias, corte à água, centros de soldagem, etc.) na região de Curitiba. Alguns orçamentos em oficinas também foram realizados para servir de base, como a proposta do corpo de motor soldado.

3.2.4 Bancada de medições

Adaptando a mesma metodologia de Pereira (2015) para a medição dos parâmetros de saída do motor Stirling reprojeto, alguns equipamentos serão utilizados para a medição da potência de saída, rotação e temperatura da fonte quente. No Quadro 6, cada equipamento utilizado é listado, bem como sua finalidade. Serão eles que fornecerão os resultados experimentais ao final do capítulo.

Ilustração	Descrição do equipamento	Finalidade
	Gerador Elétrico 24 Vdc, Resistor 50Ω, LED	Sistema elétrico usado para calcular a potência eficaz do motor
	Multímetro digital ET - 1002	Medir a tensão e a corrente elétrica do sistema elétrico
	Termômetro infravermelho	Medir a temperatura da fonte quente
	Foto Tacômetro Digital MDT - 2244B	Medir a rotação do motor
	Aquecedor a Gás/ Maçarico de acetileno e butano	Fonte quente do motor Stirling

Quadro 6 – Lista de equipamentos de medição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Reprojeto Detalhado

O detalhamento do reprojeto se dará início, mas não antes de serem avaliadas e argumentadas as propostas, soluções ou alternativas listadas por meio da fase de reprojeto preliminar. As principais justificativas referentes à escolha definitiva de materiais, às tolerâncias aplicadas e aos processos de fabricação utilizados serão citadas ao longo do detalhamento de cada parte do motor analisada. Ainda, serão mostrados os principais ajustes realizados com base nos primeiros resultados obtidos com a operação do motor, bem como algumas otimizações do motor Stirling.

Como auxílio nas tomadas de decisão, e como sendo uma ferramenta do mapeamento “AS IS”, salientado na parte de reprojeto conceitual, a Tabela 5 (análoga à Tabela 1) mostra uma comparação da frequência entre as principais características observadas no mercado, no que se referem aos motores Stirling práticos e didáticos. Os resultados desse comparativo foram frutos de estimativas, da análise das referências e, principalmente, do LEA.

Como exemplos, já é possível escolher uma determinada alternativa do projeto preliminar, com base nas características de peso, número de componentes e configurações mais presentes no mercado. Ao final deste capítulo, outra tabela será mostrada para comparar o motor de Pereira (2015) e o motor reprojeto, no que se refere às características operacionais e àquelas evidenciadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação de frequência entre as características de Motor Stirling

Característica geral	Característica específica	Modelos Práticos	Modelos Didáticos	Projeto base
Configuração do motor	Alfa	50%	40%	<input type="checkbox"/>
	Beta	30%	30%	<input type="checkbox"/>
	Gama	20%	30%	<input checked="" type="checkbox"/>
Disposição dos pistões	Vertical	50%	50%	<input type="checkbox"/>
	Horizontal	50%	50%	<input checked="" type="checkbox"/>
Número de pistões de deslocamento	1	70%	90%	<input checked="" type="checkbox"/>
	2 ou mais	30%	10%	<input type="checkbox"/>
Regenerador	Presença	80%	20%	<input type="checkbox"/>
Potência	P < 15W	15%	80%	<input checked="" type="checkbox"/>
	15W < P < 1kW	25%	20%	<input type="checkbox"/>
	P > 1kW	60%	0%	<input type="checkbox"/>
Fonte de energia	Não-renovável	25%	5%	<input checked="" type="checkbox"/>
	Renovável	75%	95%	<input checked="" type="checkbox"/>
Fluido de trabalho	Ar	80%	95%	<input checked="" type="checkbox"/>
	Hidrogênio	15%	1%	<input type="checkbox"/>
	Hélio	5%	1%	<input type="checkbox"/>
Aplicações	Geração energia elétrica	30%	10%	<input checked="" type="checkbox"/>
	Geração energia térmica	20%	5%	<input type="checkbox"/>
	Refrigeração	20%	0%	<input type="checkbox"/>
	Propulsão de veículos	10%	0%	<input type="checkbox"/>
	Iluminação	10%	40%	<input type="checkbox"/>
	Ventilação	5%	40%	<input type="checkbox"/>
	Outros	5%	5%	<input checked="" type="checkbox"/>
	Aprendizado	5%	75%	<input checked="" type="checkbox"/>
Eficiência	> 40%	80%	25%	<input type="checkbox"/>
	< 40%	20%	75%	<input checked="" type="checkbox"/>
Peso	> 1 kg	60%	20%	<input checked="" type="checkbox"/>
	< 1 kg	40%	80%	<input type="checkbox"/>
Número de componentes	> 20	90%	30%	<input checked="" type="checkbox"/>
	< 20	10%	70%	<input type="checkbox"/>
Compactabilidade	> 2litros (0,002 m ³)	75%	15%	<input checked="" type="checkbox"/>
	< 2litros (0,002 m ³)	25%	85%	<input type="checkbox"/>
Custo de fabricação	> R\$300,00	dados insuficientes	75%	<input checked="" type="checkbox"/>
	< R\$300,00	dados insuficientes	25%	<input type="checkbox"/>

4.1.1 Corpo do motor e câmara de aquecimento

4.1.1.1 Material

Analisando as opções de materiais para o corpo do motor, as principais referências citadas e indo de encontro com o intuito de garantir boa capacidade de transferência de calor dos componentes, facilidade de fabricação, peso e baixo custo, optou-se por utilizar alumínio para as câmaras de deslocamento, resfriamento e também para o conector, e aço inox para a câmara de aquecimento. A utilização de ferro fundido para essa parte é atrativa, visto o baixo custo deste material e condutividade térmica elevada, mas isso acabaria acarretando em um motor mais pesado (cerca de 0,1 kgf a mais).

4.1.1.2 Formato

Dentro das opções de corpo de motor, a opção com conector não cilíndrico foi utilizada. Acredita-se que pode ser conseguido um alinhamento de montagem superior por meio deste formato de corpo de motor, já que as outras duas opções oferecem a utilização de um conector cilíndrico.

Além disso, os processos de fabricação envolvidos na primeira opção (que considera o corpo do motor como sendo um só componente) acabariam acarretando num aumento de custo (cerca de R\$220,00, ver Quadro 5) e tempo, já que sua complexidade, devido à solda, é elevada. A aplicação de solda em peças de alumínio não é recomendada, visto que poderia alterar o alinhamento das câmaras e até mesmo o dimensionamento dos componentes soldados.

Dessa forma, as câmaras de alumínio foram torneadas e furadas, sendo aplicada uma tolerância mais estreita (ver Tabela 5) no diâmetro da superfície que abraça a haste de transmissão. O conector será fabricado a partir do fresamento e furação de um bloco de alumínio. Para os pontos de conexão entre câmaras e conector, o processo de rosqueamento foi aplicado nas faces das câmaras adjacentes às faces planas do conector, sendo empregados parafusos Allen. Anéis O'ring foram colocados para vedar corretamente os três componentes do corpo do motor. A câmara de aquecimento e deslocamento são montadas por interferência.

4.1.1.3 Aletamento de superfície

Seguindo as principais hipóteses de transferência de calor e os cálculos para a análise de viabilidade de aletamento por meio do conhecimento da efetividade ε_a (Apêndice B), optou-se por fabricar as câmaras de deslocamento e resfriamento sem aletas. As vantagens dessa escolha são grandes, já que a economia gerada (cerca de R\$100,00) devido ao tempo que seria gasto para torneiar as superfícies das câmaras será considerável (como pode ser visto no Quadro 5).

Considerando o princípio didático, muitas vezes deseja-se manter um aspecto atraente do produto. As aletas, nesse sentido, podem ser sinônimo de design e estarem intimamente ligadas ao aspecto construtivo quando se trata do estado de exibição de um motor qualquer. Por esse motivo, os dimensionamentos das aletas para as duas câmaras citadas podem ser verificados no Apêndice B.

Na Figura 33, tem-se a montagem do corpo do motor fabricado.

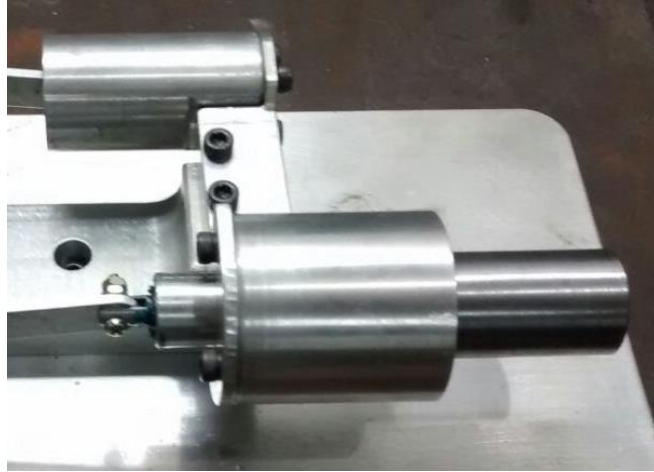


Figura 33: Corpo do motor.

4.1.2 Partes móveis

4.1.2.1 Pistão deslocador e Haste de transmissão

Para o pistão deslocador de alumínio, não será implementado alívio de peso, já que o emprego do processo de furação não acarretaria em uma mudança drástica do peso do componente (cerca de 5 gramas). Além disso, a fabricação de uma tampa é economizada (R\$30,00) e possíveis problemas com vedação do pistão são evitados.

Logo, o pistão foi torneado de modo a manter sua circularidade e dimensionamento do seu diâmetro o mais próximo do nominal. Para a haste de transmissão, optou-se pela escolha da haste de aço retificado vendida comercialmente (a fabricação de uma haste custaria, segundo Quadro 5, em torno de R\$100,00). Dessa forma, apenas uma de suas extremidades é trabalhada, sendo serrada e furada para a conexão com a biela. Os dois componentes foram montados por meio de ajuste por interferência, economizando o emprego de pinos, buchas ou parafusos. Na Figura 34, tem-se a montagem do pistão deslocador e sua haste de transmissão.



Figura 34: Pistão deslocador e haste de transmissão.

4.1.2.2 *Pistão de potência*

Assim como o pistão deslocador, para o pistão de potência foi utilizado alumínio como matéria-prima. A dimensão reduzida deste pistão exigiu a aplicação de um material com melhor usinabilidade (em comparação ao ferro fundido). Para compensar no alumínio a característica auto lubrificante do ferro fundido, dois anéis O'ring foram posicionados em duas reentrâncias do corpo do pistão de potência. Isso garante, além da redução de atrito entre as partes de alumínio, boa vedação em relação à câmara de resfriamento. A Figura 35 ilustra o pistão de potência.



Figura 35: Pistão de potência.

4.1.2.3 *Sistema de transmissão (volantes, bielas e eixo)*

Todo o sistema de transmissão será fabricado em alumínio, devido à leveza do material. Os volantes foram torneados em forma de disco, sem um perfil que exija grandes deslocamentos da ferramenta de corte. A forma de conexão entre os volantes será através do eixo de transmissão de aço retificado (comercial) ajustado por interferência, evitando o uso de parafusos. Cabe salientar que o ângulo de fase entre os volantes deve ser ajustado em torno de 90° , já que pela Teoria de Schmidt, é o ângulo que fornece a maior potência. Para ligar os volantes às bielas, parafusos Allen e buchas de nylon são usadas (leves e com baixo atrito superficial), não havendo dessa forma a utilização de rolamentos comerciais e reduzindo custos (ver Quadro 5). O sistema de transmissão pode ser visualizado na Figura 36.



Figura 36: Sistema de transmissão.

4.1.3 Base e suporte

A fabricação da base em ferro acarretaria num aumento elevado do peso total do motor (cerca de 0,3 kgf a mais). Dessa forma, uma base de alumínio chanfrada é utilizada, com um suporte de motor fresado por meio de um bloco também de alumínio. A decisão de cortar chapas de alumínio à água para o suporte acarretaria num custo maior para o projeto (cerca de R\$50,00), visto que o fresamento de um bloco garante uma precisão suficiente para o alinhamento de montagem que se deseja obter. Os dois componentes podem ser vistos na ilustração da montagem do motor, contida na Figura 37.

4.1.4 Tolerâncias aplicadas e medições

Na Tabela 6, estão descritas todas as tolerâncias geométricas e de montagem dos componentes do motor Stirling tipo gama, bem como suas medições com instrumentos específicos. Buscou-se aplicar tolerâncias estreitas nas regiões mais críticas, como entre a haste de transmissão e a câmara de deslocamento, de modo a não ser necessário aplicar neste o processo de retificação (economia de R\$80,00). As tolerâncias aplicadas não repercutiram drasticamente nos custos de fabricação.

Tabela 6 – Tolerâncias aplicadas e medições do motor Stirling.

Componente/ submontagem	Região/ Ajuste e tolerância	Valor projeto [mm]	Valor medido [mm]	Instrumento
Câmara de deslocamento	Posição Furo lateral	5 ±0,15	4,9	Paquímetro (0,05mm)
Câmara de resfriamento	Posição Furo lateral	5 ±0,15	5,1	Paquímetro (0,05mm)
Conector	Paralelismo faces adjacentes às câmaras	0,1	0,04	Relógio Comparador (0,01mm)
	Posição Furos do conector	5 ±0,15	4,9 (face câmara fria) 4,95 (face câm. quente)	Paquímetro (0,05mm)
Pistão deslocador e haste de transmissão	Montagem (interferente)	4,5 (H7/r6)	Ø furo pistão: 4,50 Ø haste: 4,55	Micrômetro (0,01mm)
Câmara de deslocamento e haste de transmissão	Montagem (deslizante)	5 (H6/h6)	Ø câmara: 5,01 Ø haste: 4,99	Micrômetro (0,01mm)
Câmaras de deslocamento e de aquecimento	Montagem (interferente)	18,3 (H7/r6)	Ø câmara desloc.: 18,27 Ø câmara aquec.: 18,32	Micrômetro (0,01mm)
Câmara de resfriamento e Pistão potência (Alumínio)	Montagem (folga de 5mm p/ os anéis O'ring)	Ø câmara resfri.: 13,0 (H7/f6) Ø pistão potência: 12,5 (H7/f6)	Ø câmara resfriamento: 13,17 Ø pistão potência: 12,46	Micrômetro (0,01mm)
Volantes e eixo de transmissão	Montagem (interferente)	4,5 H7/r6	Ø furo volante: 4,50 Ø haste: 4,55	Micrômetro (0,01mm)

4.1.5 Protótipo

O protótipo do motor Stirling tipo gama didático pode ser visualizado na Figura 37. Percebe-se o aspecto compacto e simples do motor, em comparação com o motor de Pereira (2015) ou até com motores da mesma formatação destacados no LEA.

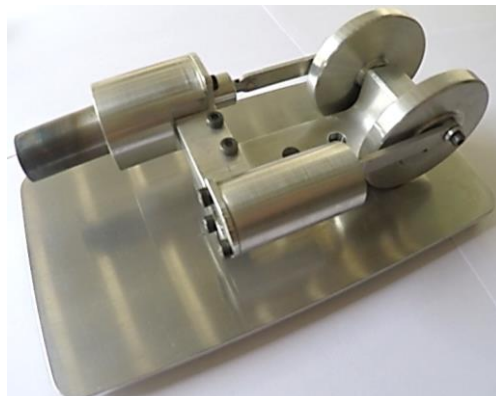


Figura 37: Protótipo do Motor Stirling tipo gama.

4.1.6 Custo final do reprojeto sem otimização

Na Tabela 7, são reunidas as informações de cada componente utilizado, evidenciando o custo individual de cada um (fabricação e material). O custo detalhado de cada componente pode ser visto no Apêndice C.

Tabela 7 – Peso e Custo Final do Motor.

Componentes	Material	Qtde.	Peso [kgf]	Custo Fabricação + Material
Pistão deslocador	Alumínio	1	0,021	R\$ 38,00
Pistão de potência	Alumínio	1	0,004	R\$ 45,00
Câmara de aquecimento	Aço inox	1	0,016	R\$ 40,00
Câmara de resfriamento	Alumínio	1	0,02	R\$ 50,00
Câmara de deslocamento	Alumínio	1	0,04	R\$ 60,00
Conector	Alumínio	1	0,02	R\$ 100,00
Haste de transmissão	Aço Retificado	1	0,005	R\$ 50,00
Volantes de transmissão	Alumínio	2	0,1	R\$ 80,00
Eixo de transmissão	Aço Retificado	1	0,0023	R\$ 10,00
Biela	Alumínio	2	0,003	R\$ 36,00
Buchas	Nylon/ Alumínio/ Cobre	3	0,0005	R\$ 2,00
Anel de vedação O'ring	Composto de borracha	4	0,0005	R\$ 4,00
Parafusos Allen	Aço	11	0,005	R\$ 5,00
Suporte	Alumínio	1	0,25	R\$ 65,00
Base	Alumínio	1	0,18	R\$ 65,00
Total		32	0,6673	R\$ 650,00

4.1.7 Ajustes, otimizações e funcionamento

Devido ao tamanho compacto do motor e, por esse motivo, a potência de saída se torna muito baixa (pela teoria, em torno de 0,02W), o desafio encontrado, depois de serem realizados os primeiros testes, foi a redução do atrito dos componentes móveis do motor. De fato, a potência de saída é tão baixa que ela quase se iguala à potência em vazio do motor.

Dessa forma, alguns ajustes (sem acréscimo considerável de custo) foram empregados para que o motor pudesse funcionar, e algumas otimizações (com acréscimo de custo) foram realizadas para que ele pudesse operar nas mesmas condições do protótipo de Pereira. A seguir, todos os ajustes e otimizações serão descritos com base na redução de atrito e otimização de materiais e troca térmica.

4.1.7.1 Redução de atrito

Em um primeiro momento, a presença de um atrito elevado exigiu a utilização de óleos lubrificantes de baixa viscosidade. Verificou-se que o pistão de potência exerce papel fundamental no funcionamento do motor, uma vez que se deve aliar boa vedação com baixo atrito entre este e a câmara de resfriamento. O teste com Anéis O'ring de diferentes diâmetros e a diminuição do curso do pistão de potência foram alternativas encontradas para minimizar o atrito desse conjunto. Além disso, o

polimento da superfície interna da câmara de resfriamento com uma lixa fina também foi um procedimento empregado.

Ainda, o contato das faces das bielas com as faces dos volantes também foi um fator que se levou em conta para o acréscimo de atrito. A adição de arruelas entre os dois componentes permitiu um distanciamento suficiente para que não houvesse tanto atrito na região.

Para as partes de conexão também foram encontradas soluções que pudessem diminuir o atrito. Para a conexão entre a haste de transmissão do deslocador e a biela, o parafuso com porcas inicial foi substituído por uma bucha remanchada oriunda de um pequeno fio de cobre (superfície lisa que se molda à região de conexão).

É necessário lembrar que todos os ajustes realizados para a redução do atrito foram escolhidos com base do maior para a menor grau de simplicidade, com alternativas que não acarretassem em um aumento elevado de tempo e custo para o projeto. Com a redução do atrito geral do motor por meio desses ajustes citados (que não comprometeram em acréscimo de custo), só foi possível funcionar o motor Stirling com a utilização de um maçarico de acetileno, com uma temperatura bem superior (cerca de 1500°C) aos 400°C definido como parâmetro de entrada.

Com o aquecimento da câmara por meio da fonte quente durante poucos segundos, o motor Stirling ainda necessita de um pequeno impulso para que o seu funcionamento inicie (todos os motores Stirling necessitam desse auxílio). Aplicando uma pequena força e girando uma das rodas de transmissão, o movimento dos pistões se completa e o motor opera de forma contínua, contanto que a fonte quente esteja presente. A temperatura da fonte quente pode ser aumentada até que a potência de saída atinja um máximo.

Para que o motor reprojeto opere aos 400°C, outros fatores se mostram sensíveis a uma otimização, como a diminuição do atrito nas regiões de deslizamento das câmaras de deslocamento e resfriamento. O ajuste interferente com o emprego de anéis O'ring no pistão de potência de alumínio, bem como o deslizamento da haste de transmissão de aço em uma parede de alumínio foram fatores que exigiram a utilização de óleos lubrificantes. Uma vez que o motor possui tamanho compacto, o arraste por parte desses fluidos (mesmo utilizando óleos com baixa viscosidade) nessas regiões foi considerável.

4.1.7.2 Otimização da troca térmica

Devido ao tamanho compacto do motor, o tempo de funcionamento não se estendeu indefinidamente com os testes. Isso se deve ao fato do elevado calor proveniente da fonte quente ser conduzido, depois de alguns minutos, pelos componentes de alumínio (desde à câmara de deslocamento até à câmara de resfriamento) a ponto de atenuar a diferença de temperatura entre essas regiões. Uma placa defletora foi posicionada entre as câmaras de aquecimento e deslocamento para garantir por maior tempo essa diferença de temperaturas, de fundamental importância para o funcionamento do motor. Acredita-se que o maçarico de acetileno (altas temperaturas) e a falta de aletas na câmara de deslocamento possam ter contribuído para a mais rápida condução de calor entre os componentes citados.

A falta de aletas nas câmaras se mostrou um facilitador para a transferência de calor da câmara de aquecimento para a câmara de resfriamento. Salienta-se que o estudo de viabilidade de aletamento considera cada componente como estando isolado, ou seja, ele não analisa o efeito global de transferência de calor de todo o conjunto do motor. Dessa forma, considera-se que, pelo tamanho reduzido do motor, o estudo de viabilidade de aletamento possa se mostrar mais confiável para motores de maiores dimensões.

4.1.7.3 Otimização de materiais

É interessante mencionar que, depois de serem realizados alguns testes, a câmara de aquecimento de aço carbono 1020 (primeiramente utilizada) oxidou devido à utilização do maçarico de acetileno. Com isso, tanto a sua parte externa quanto a parte interna começaram a oxidar, o que acarretou em conseqüente acréscimo de atrito entre a região interna das câmaras e o pistão deslocador. A alternativa encontrada foi substituir a câmara de aquecimento de aço comum por outra de aço inoxidável.

Logo, para a melhoria do desempenho geral do motor, outras alternativas se mostraram interessantes para a redução de atrito e melhorias de materiais e da transferência de calor: alívio de peso no pistão deslocador; aletamento da câmara de deslocamento; adição de uma bucha de bronze grafitado na região da haste de transmissão do pistão deslocador; e substituição do conjunto câmara de resfriamento e pistão de potência (ambos de alumínio e com anéis O'ring) por um conjunto de ferro fundido sem anéis O'ring.

4.1.7.4 Resumo das otimizações

Dessa forma, as otimizações citadas foram realizadas no motor Stirling tipo gama para que ele pudesse operar por mais tempo e na temperatura de operação teórica definida. Todas as otimizações, bem como o custo de cada uma (ver custo detalhado no Apêndice C) são descritas na Tabela 8.

Tabela 8 – Série de otimizações do motor Stirling.

Nº	Otimização	Ilustração	Motivo/ Contribuição	Custo de fabricação + Material
1	Troca da câmara de aquecimento 1020 por aço inox		Redução da oxidação devido à ação da fonte quente	R\$ 50,00
2	Redução de peso do pistão deslocador		A redução de peso desse componente traz benefícios para a potência de saída do motor, podendo funcionar com temperaturas menores.	R\$ 30,00
3	Aletamento da câmara de deslocamento		Melhoria do tempo de operação do motor, garantindo uma maior permanência da diferença de temperaturas entre as câmaras quente e fria.	R\$ 80,00
4	Adição de bucha de bronze grafitado na região que engloba a haste de transmissão		Além de reduzir o atrito na região, a bucha de bronze dá mais durabilidade ao motor Stirling, uma vez que a parede de alumínio desgasta mais facilmente com o movimento da haste de aço retificado.	R\$ 30,00
5	Substituição da câmara de resfriamento de alumínio por ferro fundido		A substituição desse conjunto de alumínio por ferro fundido contribui para a redução de atrito (uma vez que o ajuste com anéis O'ring é mais interferente) e contribui para maior tempo de operação do motor, devido à sua maior condutividade térmica.	R\$ 40,00
	Substituição do pistão de potência de alumínio com anéis O'ring por um de ferro fundido sem anéis O'ring			R\$ 60,00
Total				R\$ 290,00

Da mesma forma, mais tolerâncias dimensionais foram aplicadas para as otimizações e medições foram realizadas, conforme pode ser conferido na Tabela 9.

Tabela 9 – Tolerâncias aplicadas e medições de componentes otimizados.

Componente/ submontagem	Região/ Ajuste e tolerância	Valor projeto [mm]	Valor medido [mm]	Instrumento
Pistão de potência e câmara de resfriamento (ferro fundido)	Montagem (deslizante)	H6/h6	Ø câmara resf.: 12,30 Ø pistão potência: 12,28	Micrômetro (0,01mm)
Bucha bronze grafitado e haste de transmissão	Montagem (deslizante)	5 (H6/h6)	Ø bucha: 5,01 Ø haste: 4,99	Micrômetro (0,01mm)

A Figura 38 evidencia o motor Stirling tipo gama otimizado, e pode-se notar um formato mais atraente de motor devido às aletas. Detalhe para a placa defletora mencionada anteriormente, que também foi mantida para os testes realizados com o maçarico de butano.



Figura 38: Motor Stirling tipo gama otimizado.

4.1.8 Resultados experimentais

A funcionalidade do motor Stirling tipo gama com baixo custo de fabricação se tornou comprovada. Porém, o baixo tempo de operação do motor (máximo de dois minutos) e o funcionamento em uma temperatura de operação bem maior que a ideal (para que o estudo de comparação em relação ao projeto base seja o mais fiel possível) são fatores que exigiram atenção e serviram como argumentos para as otimizações antes descritas.

Em relação à fonte quente do motor Stirling, como já mencionado, primeiramente foi utilizado um maçarico de acetileno. Como a temperatura do fototacômetro é capaz de registrar o máximo de 400°C, estima-se que a temperatura obtida com este tipo de maçarico se aproximou de 1500°C. De qualquer forma, os resultados experimentais com este tipo de fonte quente foram anotados e serão comparados com os resultados obtidos com a utilização de um maçarico de butano.

É importante mencionar que a confiabilidade entre um teste e outro não é tão elevada, visto que algumas variações podem ser sentidas no que se refere ao local exato de medição dos dados de rotação com o foto-tacômetro e ao posicionamento exato da chama, fatores que podem repercutir em valores de saída diferentes ao longo das medições. Entre um teste e outro, houve um tempo suficiente para que o motor resfriasse completamente. Nas Figuras 39 e 40 é possível ver os testes de medição da rotação e potência, respectivamente.

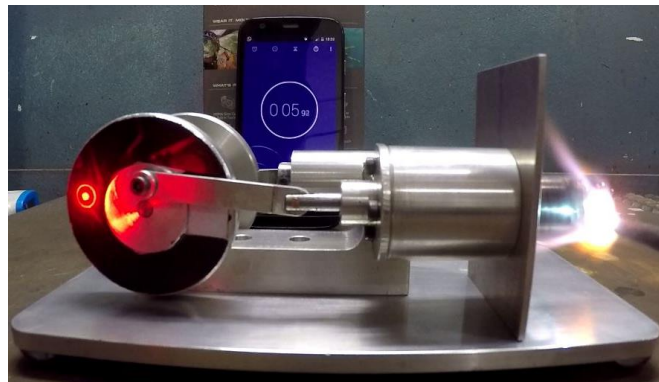


Figura 39: Teste de rotação do Motor Stirling.



Figura 40: Teste de potência do Motor Stirling.

4.1.8.1 Resultados com maçarico de acetileno

Para efeito de análise, os gráficos ilustrados nas Figuras 41 e 42, mostram a variação da rotação e potência com o tempo de funcionamento do motor Stirling. A temperatura da câmara de aquecimento foi medida e considerada constante em 1500°C durante cada teste, visto que foi utilizado um maçarico de acetileno e em poucos segundos essa temperatura era atingida. Ainda, o impulso nos volantes foi dado no décimo segundo a partir do aquecimento pelo maçarico de acetileno.

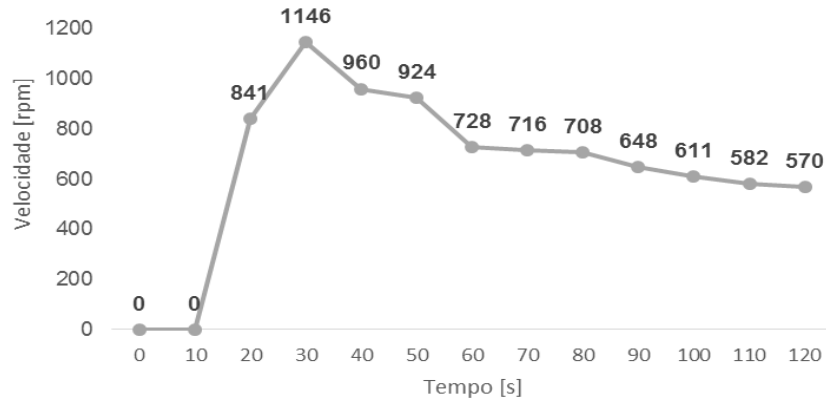


Figura 41: Curva de velocidade ao longo do tempo.

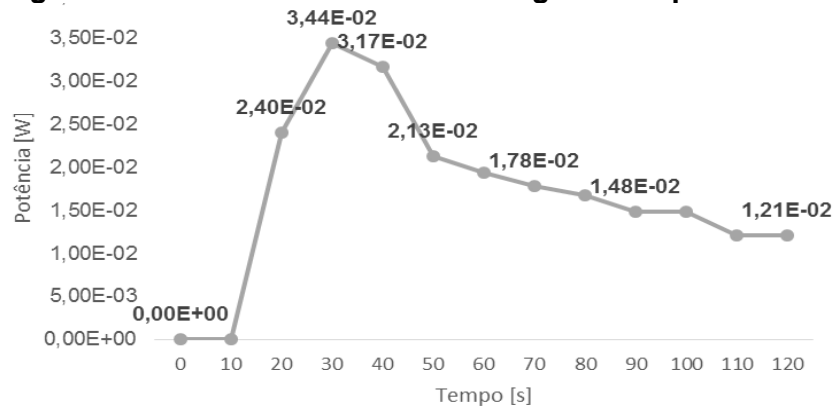


Figura 42: Curva de potência ao longo do tempo.

Percebe-se que por volta de 20 segundos a partir do impulso ao volante é que ocorrem as máximas rotações e potências de saída do motor Stirling. De fato, como visto na seção anterior, a manutenção da diferença de temperaturas entre as câmaras de aquecimento e resfriamento por um maior tempo não foi possível, devido ao fato do calor ser conduzido rapidamente para o restante dos componentes do motor.

Assim, em comparação com os resultados teóricos, o motor Stirling tipo gama reprojeto forneceu, para os valores de temperatura considerados na Tabela 4, a potência máxima de 0,034 W e 1146 rpm de velocidade.

4.1.8.1 Resultados com maçarico de butano

Os testes com o motor Stirling otimizado foram realizados com um maçarico portátil de butano (Figura 43), fazendo-o operar à temperatura de 400°C. Similarmente aos testes anteriores, o resultado experimental do teste de rotação do motor Stirling otimizado pode ser conferido na Figura 45. Porém, o impulso nos volantes se deu no vigésimo segundo a partir do início do aquecimento pelo maçarico de butano. Salienta-se que, antes da quinta otimização (Tabela 7), ainda com a câmara de resfriamento e pistão de potência de alumínio (com anéis O'ring), alguns testes foram realizados e o motor atingiu uma velocidade aproximada de 850 rpm. Após estes testes, o motor

começou a apresentar desempenho bem inferior, devido ao provável desgaste desses componentes de alumínio, o que motivou a realização da quinta otimização salientada anteriormente.

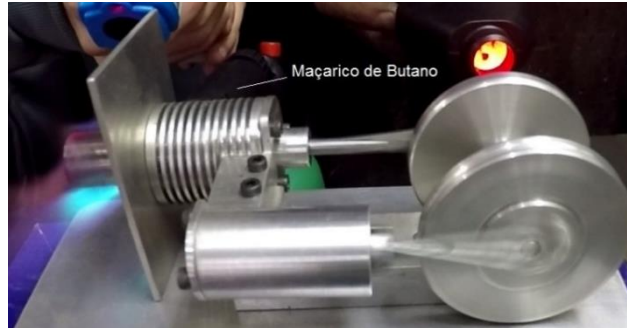


Figura 43: Teste de rotação do motor Stirling otimizado.



Figura 44: Teste de potência do motor Stirling otimizado.

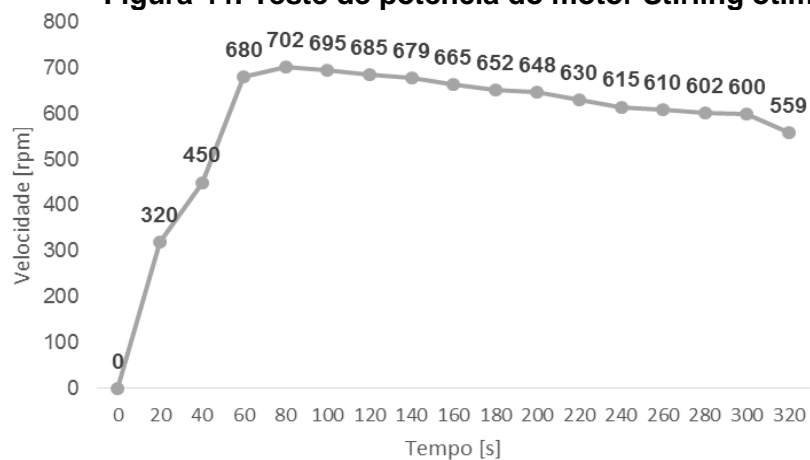


Figura 45: Curva otimizada de velocidade ao longo do tempo.

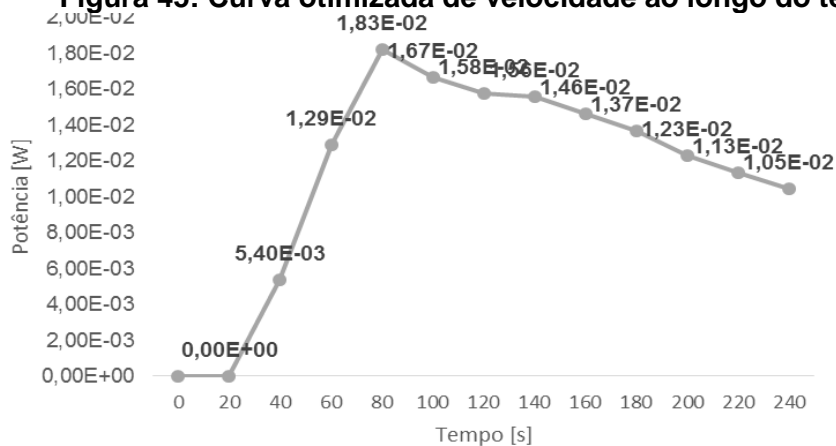


Figura 46: Curva otimizada de potência ao longo do tempo

O motor Stirling otimizado apresentou, evidentemente, menor rotação e potência máxima (702 rpm e 0,018 W) devido à utilização de um maçarico de butano, operando em menores temperaturas. Houve certamente uma notável redução de atrito e também uma melhora térmica em relação ao protótipo sem otimização. Assim, devido às alterações implementadas, o tempo de operação foi maior que os dois minutos anteriormente registrado. Um comparativo entre os valores teóricos e experimentais do motor Stirling (com e sem as otimizações) é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparativo dos valores de saída teóricos e experimentais

Parâmetro de saída	Motor Stirling		Unidade	
	Valor teórico	sem otimizações		com otimizações
Temperatura da fonte quente	400	1500	400	°C
Temperatura da fonte fria	25	22	30	°C
Diâmetro do disco de inércia	35	58	58	mm
Potência do motor	0,022	0,034	0,018	W
Pressão máxima do motor	147	-	-	kPa
Trabalho	0,01	-	-	J
Eficiência	57,1	-	-	%
Velocidade máxima	250	1146	702	rpm

4.1.8.1 Resultados comparativos

Para uma comparação mais adequada, as principais características do motor do projeto base (PEREIRA, 2015) e do motor reprojetoado (com e sem otimizações) serão mostradas a seguir na Tabela 11. Como critério comparativo principal, a relação potência/peso será evidenciada, pois a redução de custos obtida pode acabar implicando numa perda de desempenho do motor.

Salienta-se que algumas informações da Tabela 11 foram obtidas diretamente com Pereira (2015), como o custo de fabricação e tempo de montagem.

Tabela 11 – Tabela comparativa entre os motores

Característica	Motor Stirling Pereira (2015)	Motor Stirling s/ otimizações	Motor Stirling c/ otimizações
Custo de fabricação	R\$ 1.000,00	R\$ 650,00	R\$ 890,00
Temperatura de fonte quente	400 °C	1500 °C	400 °C
Temperatura da fonte fria	29,3 °C	22 °C	30 °C
Tempo de operação	> 10 min	2 min	> 5 min
Rotação	1150 rpm	1146 rpm	702 rpm
Potência	0,02 W	0,034 W	0,018 W
Peso	± 1,5 kgf	0,900 kgf	0,850 kgf
Relação Potência/ Peso	0,013 W/kgf	-	0,021 W/kgf
Tempo de montagem/ desmontagem (manual)	15 min	5 min	5 min
Compacto (volume < 0,002 m ³)	Não	Sim	Sim
Fonte quente	Butano	Maçarico de acetileno	Maçarico de butano

5 CONCLUSÕES

Por meio do perfeito entendimento da fundamentação teórica, do seguimento das principais teorias (como a teoria de Schmidt e teorias térmicas) e com o desenvolvimento de uma metodologia de reprojetado adequada, conclui-se que os principais objetivos do trabalho foram atingidos. Assim sendo, o motor Stirling tipo gama didático reprojetado, apresentou menor custo de fabricação, ficando mais leve e compacto, e apresentando características térmicas e mecânicas que não comprometeram a sua funcionalidade.

Em relação à metodologia de reprojetado aplicada, a mesma foi de grande importância para a redução do custo de fabricação do motor de Pereira (2015), uma vez que as ferramentas aplicadas (como o LEA, o mapeamento “AS IS” e a divisão sistemática das etapas de reprojetado) contribuíram para que possíveis pontos de melhoria fossem identificados. Com isso, novas ideias foram implementadas na fabricação do motor, em função do conhecimento prévio de modelos de motor Stirling no mercado.

Dessa forma, tendo em vista a aplicação de estudos de viabilidade por meio de teorias térmicas, a utilização de alternativas que acrescentassem para a qualidade final do motor Stirling (como o uso de tolerâncias e soluções de montagem) e o detalhamento da metodologia aplicada para a fabricação do motor, os seguintes pontos de melhoria foram atingidos:

- a. O estudo de viabilidade de aletamento, mesmo que na prática não tenha se confirmado, mostra-se importante para futuros projetos preliminares, de forma a servir como base para a otimização de custos de fabricação de motores de maiores dimensões;
- b. O uso de tolerâncias geométricas e de montagem contribuiu, por meio do detalhamento dos desenhos de fabricação, para o enriquecimento do reprojetado, além de servir de espelho para a escolha de processos de fabricação adequados, repercutindo diretamente na redução de custos;
- c. O detalhamento das fases da metodologia de reprojetado colabora, desde o início, para evidenciar o estudo comparativo entre modelos de mercado e o modelo de Pereira, de forma a explicitar os principais problemas e soluções associados aos motores Stirling. Como exemplo, as otimizações

realizadas permitiram aprofundar este estudo comparativo (conforme Tabela 11), indo além da delimitação do escopo de pesquisa definida no início do trabalho.

Logo, a redução dos custos de fabricação, proposta como objetivo principal, não interferiu drasticamente no desempenho do motor Stirling tipo gama otimizado em relação ao protótipo de Pereira. Para as mesmas condições operacionais, a relação potência/peso obtida foi maior e outros pontos de melhoria foram alcançados, como menores de tempos de montagem e desmontagem do motor e maior facilidade de transporte (devido ao tamanho reduzido e menor número de componentes).

Ainda, com os resultados experimentais, outras soluções surgiram para que os ajustes e correções necessários fossem aplicados, desde o emprego de materiais alternativos até novas técnicas para redução do atrito. Com isso, foi possível desde já, contribuir para um futuro enriquecimento de projetos preliminares para a fabricação de motores Stirling do tipo gama.

5.1 Sugestões

Algumas sugestões de estudos futuros para a gradativa melhoria do motor Stirling são listadas a seguir:

- a. Tratamento térmico de materiais (pistões e câmaras) e análise da metalografia. Com isso, pode ser possível aumentar a resistência mecânica e térmica dos componentes;
- b. Análise das trocas de calor das superfícies do motor por meio de simulações computacionais e de métodos numéricos adequados, de modo a obter maior compreensão do comportamento térmico dos componentes e do conjunto montado;
- c. Estudo mais profundo do aletamento de superfícies, por meio da aplicação de teorias mais refinadas de transferência de calor. Caso a aplicação de aletas seja necessária, a estimativa de um número ótimo de aletas ou a escolha de parâmetros dimensionais mais adequados podem ser objetos deste tipo de estudo.
- d. Análise estrutural das partes móveis do motor, evoluindo sua dinâmica a ponto de influenciar positivamente no desempenho do motor (menores atritos, maiores rotações e potência de saída).

- e. Relacionar o efeito do custo de fabricação (técnicas de fabricação e materiais mais refinados) no desempenho do motor. Por exemplo, se a retificação de componentes, que pode diminuir o atrito superficial e aumentar a precisão dimensional justifica sua aplicação frente ao alto custo associado e este tipo de fabricação.

REFERÊNCIAS

ANGELINO, GIANFRANCO. Potential Performance of Real Gas Stirling Cycle Heat Pumps. 1996. **International Journal of Refrigeration**, 1996.

ASTROMEDIA. Cardboard kits of scientific instruments, models, gadgets, and optical components for experiments, education, and astronomy. Disponível em: <<http://www.astromediashop.co.uk/>> Acesso em: 6 outubro 2015.

BARROS, R. W. **Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis**. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0030363.pdf>>. Acesso em 15 outubro 2015.

BITENCOURT, A. C. P. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Reprojetado de Produto para o Meio Ambiente**. 2001. 199 f. Dissertação (Mestrado em Projeto de Sistemas Mecânicos) – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79421/1/178179.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 10 outubro 2015.

BMW GROUPS. **Special model BMW R 1200 GS TripleBlack**, 2015. Disponível em: <<https://www.press.bmwgroup.com/>> Acesso em: 5 outubro 2015.

CLEANERGY. **Stirling CHP Systems**, 2015. Disponível em: <<http://cleanergy.com/solutions/#csp-systems>> Acesso em: 5 outubro 2015.

COOLING, G. **Brief history of Stirling machines**. Athens, Ohio, U.S.A.: Global Cooling, 2002. Disponível em: <http://www.globalcooling.com/pdfs/general_history.pdf> Acesso em: 5 outubro 2015.

DIESEL ARMY. **Dynamic Diesels: Inside The World's Largest Engine**, 2014. Disponível em: <<http://www.dieselarmy.com/engine-tech/engine/dynamic-diesels-inside-the-worlds-largest-engine/>> Acesso em: 5 outubro 2015.

DUFOUR, C. A. **Estudo do processo e das ferramentas de reprojeto de produtos industriais, como vantagem competitiva e estratégia de melhoria constante.** 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 1996.

EGGERS, Jonathan. **MSI motherboard sports Stirling engine**, 2008. Disponível em: < <https://www.jonamerica.com/technology/msi-motherboard-sports-stirling-engine/>> Acesso em: 5 outubro 2015.

HIRATA, K. Schmidt. **Theory for Stirling Engines.** Stirling Engine home page. [S.l.], 1995. Disponível em: <<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/>> Acesso em 15 outubro 2015.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Energia elétrica chega a 97,8% dos domicílios brasileiros, mostra censo demográfico.** Creative Commons, 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/11/energia-eletrica-chega-a-97-8-dos-domicilios-brasileiros-mostra-censo-demografico>> Acesso em 5 outubro 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology Roadmap: Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment.** França, 2011. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/buildings_roadmap.pdf> Acesso em 5 outubro 2015.

KONTAX STIRLING ENGINES. Motores Kontax, 2015. Disponível em: <<http://www.stirlingengine.co.uk/compare.asp>> Acesso em: 6 outubro 2015.

MANUAL DO MOTOR STIRLING. Blog sobre Motores Stirling, 2015. Disponível em: <<http://manualdomotorstirling.blogspot.com.br/>> Acesso em: 6 outubro 2015.

MARTINI, W. R. **Stirling engine design-manual.** Honolulu: University Press of the Pacific, 1983.

MATTOZO, V. A. Caderno digital de informações sobre energia, ambiente e desenvolvimento. Florianópolis, out. 2001. Disponível em: <http://www.guiafloripa.com.br/energia/energia/cenario_mundo.htm> Acesso em 5 outubro 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **Advanced Stirling Converter**. EUA, 2014. Disponível em: <<https://tec.grc.nasa.gov/rps/advanced-stirling-converter/>> Acesso em 5 novembro 2015.

OTTO, K. N. de; WOOD K.L. de. **Product Design: Techniques in reverse engineering and New Product Development**. 1 ed. Nova Jersey: Prentice Hall, Inc., 2000. p. 22-27

PAHL, G. de; BEITZ, W. de. **Engineering design: a systematic approach**. 2 Rev. ed. Berlin: Springer - Verlag London Limited, 1996.

PARIS, D. **Motor Stirling**. 2011. Disponível em: < <https://grabcad.com/library/motor-stirling--1>> Acesso em 5 de novembro de 2015.

PAUTZ, E. R. **Estudo e Projeto de um Motor Stirling**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

PEREIRA, A. M. **Fabricação e Estudo de um Motor Stirling Tipo Gama**. 2015. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industria Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PRACTICAL MACHINIST. **Steam Engine Models**. EUA, 2016. Disponível em: <<http://www.practicalmachinist.com/vb/general/steam-engine-models-138198/>> Acesso em 5 de outubro de 2015.

ROGDAKIS, E. D., PARADISSIS, E. A., BORBILAS, N. A., NIKOLAIDIS, A. P. **A MathCAD program as a simple tool for the study of the Stirling engines**. 6TH EUROPEAN STIRLING FORUM, Osnabrück, Alemanha, 2002.

ROSS, A. **Making Stirling Engines**. [S.l.] Andy Ross © 1993. Disponível em: <<http://users.atw.hu/stirling/MSE.pdf>> Acesso em 10 outubro 2015.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, 2006. p. 453-568

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

SUNPOWER INC. **Space – RHESSI**, 2015. Disponível em: <<http://sunpowerinc.com/engineering-services/applications/space-rhessi/>> Acesso em: 6 outubro 2015.

SWEDISH AEROPLANE CORPORATION (SAAB). **The Stirling Engine: An engine for the future**, 2014. Disponível em: <<http://saab.com/naval/Submarines-and-Warships/technologies/The-Stirling-Engine/>> Acesso em: 5 outubro 2015.

TAVAKOLPOUR, A. R.; ZOMORODIAN, A.; GOLNESHAN, A. A., Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator. **International Journal of Renewable Energy**, v.33, p.77-87, 2008.

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

UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND – UNICEF. **Dia Mundial da Água**: Quase 750 milhões de pessoas ainda não têm acesso a água potável adequada. Nova York, 2015. Disponível em: <http://www.unicef.org/brazil/pt/media_29176.htm> Acesso em: 5 de outubro de 2015.

WALKER, G., **Stirling Engines**, Oxford, Clarendon Press, 1980.

WHISPERGEN. Micromotores Stirling Whispergen, 2015. Disponível em: <http://www.whispergen-europe.com/productspec_en.php> Acesso em: 6 outubro 2015.

APÊNDICE A – ANÁLISE DOS VALORES DE SAÍDA TEÓRICOS (TEOREMA DE SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING TIPO GAMA)

Gustav Schmidt desenvolveu a primeira análise teórica para motores Stirling em 1871. Esta se tornou uma análise clássica para o ciclo, sendo útil para gerar uma razoável aproximação para o desempenho do motor. Porém, por se tratar de uma análise teórica, são feitas algumas suposições e simplificações, sendo que na prática, o desempenho do motor é geralmente menor que 60% do desempenho previsto pela teoria de Schmidt (ROGDAKIS, 2002).

Porém a teoria de Schmidt é muito utilizada, principalmente como uma etapa inicial para qualquer análise de motores Stirling. A teoria de Schmidt é um dos métodos de cálculo isotérmico para motores Stirling. É o método mais simples e muito usado durante o desenvolvimento do motor. Esta teoria é baseada na expansão e compressão isotérmica de um gás ideal (BARROS, 2005).

1. Considerações iniciais para a Teoria de Schmidt

O desempenho do motor pode ser calculado utilizando um diagrama P-V. O volume do motor é fácil de calcular utilizando as geometrias internas. Quando o volume, a massa do fluido de trabalho, e a temperatura são escolhidos, a pressão é calculada pelo método do gás ideal apresentado na equação (1).

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

A pressão do motor pode ser calculada com as seguintes considerações:

- a) Não há perda de calor nas trocas de calor, e não há diferenças internas de pressão.
- b) Os processos de expansão e compressão são isotérmicos.
- c) O fluido de trabalho é considerado como gás ideal.
- d) A regeneração ocorre de forma perfeita, ou seja, não há perdas no regenerador.
- e) O volume morto de expansão mantém a temperatura do gás na expansão - T_e , e o volume morto de compressão mantém a temperatura do gás na compressão - T_c durante o ciclo.
- f) A temperatura do gás no regenerador é uma média da temperatura do gás na expansão - T_e e a temperatura do gás na compressão - T_c .
- g) O volume de expansão - V_e e o volume de compressão - V_c variam conforme uma senóide.

A Figura 47 apresenta um esquema mostrando as principais variáveis de um modelo de cálculo para o motor Stirling tipo Gama.

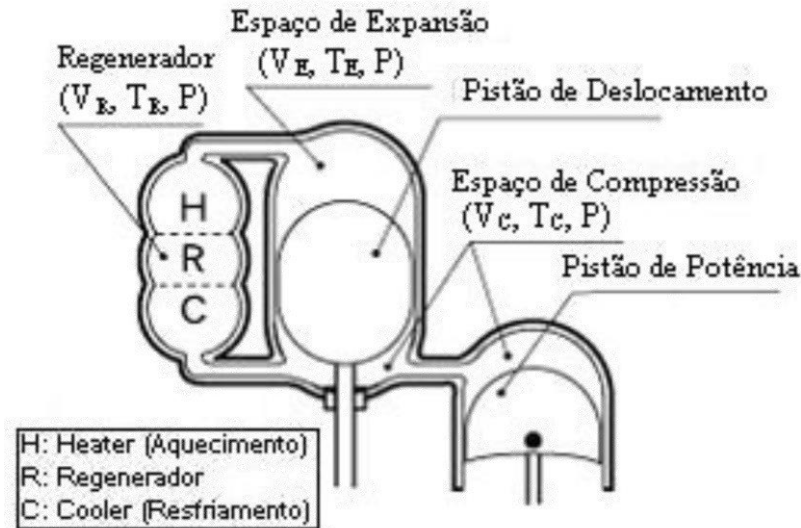


Figura 47: Arranjo esquemático com as principais variáveis do motor Stirling tipo gama
Fonte: Adaptado (HIRATA, 1995)

As equações seguintes descrevem o volume instantâneo de expansão V_E , o volume instantâneo de compressão V_C , o volume percorrido pelo pistão deslocador V_{SE} , o volume percorrido pelo pistão de potência V_{SC} e um ângulo entre o pistão deslocador e o pistão de potência dx .

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

$$V_C = \frac{V_{SE}(1 - \cos x)}{2} + \frac{V_{SC}[1 - \cos(x - dx)]}{2} + V_{DC} \quad (3)$$

É calculado o volume total instantâneo V pela seguinte equação:

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

Para pressão do motor Stirling tipo gama, temos:

$$P = \frac{P_{med}\sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 - c)}{1 - c \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 + c)}{1 - c \cos(x - a)} \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

$$a = tg^{-1}\left(\frac{v \operatorname{sen}(dx)}{t + \cos(dx) + 1}\right) \quad (11)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 \quad (12)$$

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

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

2. Eficiência, Potência Indicada e Energia

Por meio 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 $P_{máx}$.

$$\begin{aligned} E_e &= \oint PdV_E = \frac{P_{med}V_{SE}\pi c \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min}V_{SE}\pi c \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \\ &= \frac{P_{máx}V_{SE}\pi c \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \end{aligned} \quad (14)$$

A energia de compressão E_c é mostrada a seguir:

$$E_c = \oint PdV_C = -\frac{P_{med}V_{SE}\pi c t \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = -\frac{P_{min}V_{SE}\pi c t \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = -\frac{P_{máx}V_{SE}\pi c t \operatorname{sen}(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (15)$$

A energia do ciclo do motor E_i , fica:

$$E_i = E_c + E_e = \frac{P_{med} V_{SE} \pi c (1-t) \text{sen}(a)}{1 + \sqrt{1-c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1-t) \text{sen}(a)}{1 + \sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} = - \frac{P_{m\acute{a}x} V_{SE} \pi c (1-t) \text{sen}(a)}{1 + \sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-}}{\sqrt{1+}} \quad (16)$$

As relações entre as pressões P_{med} , P_{min} e P_{max} é igual as equações a seguir:

$$\frac{P_{min}}{P_{med}} = \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}} \quad (17)$$

$$\frac{P_{max}}{P_{med}} = \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} \quad (18)$$

As potências de expansão, compressão e do motor são definidas em relao a rotao n (Hz) e a Energia E (J).

$$W_E = nE_E \quad (19)$$

$$W_C = nE_C \quad (20)$$

$$W_i = nE_i \quad (21)$$

A energia indicada de expansão - E_e descrita pela equao (14) significa o calor de entrada através da fonte de calor para o motor. A energia indicada de compressão - E_c descrita pela equao (15) significa a rejeio de calor do motor para o fluido de resfriamento (gua ou ar). Então, a eficiência térmica do motor η_t é calculada na próxima equao.

$$n_t = \frac{E_i}{E_E} = 1 - t \quad (22)$$

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

O Apêndice B (tpicos 1 e 2) foi adaptado de Barros, 2005.

3. Cálculos dos valores de saıda teóricos

Os cálculos relativos às variáveis evidenciadas no Teorema de Schmidt e aos valores de saıda principais foram feitos com a ajuda do programa Microsoft Excel e podem ser visualizados na Figura 48 abaixo. Ainda, um gráfico do ciclo Stirling para um ângulo de fase de 90° foi plotado com o conhecimento dos volumes instantâneos e das pressões do motor.

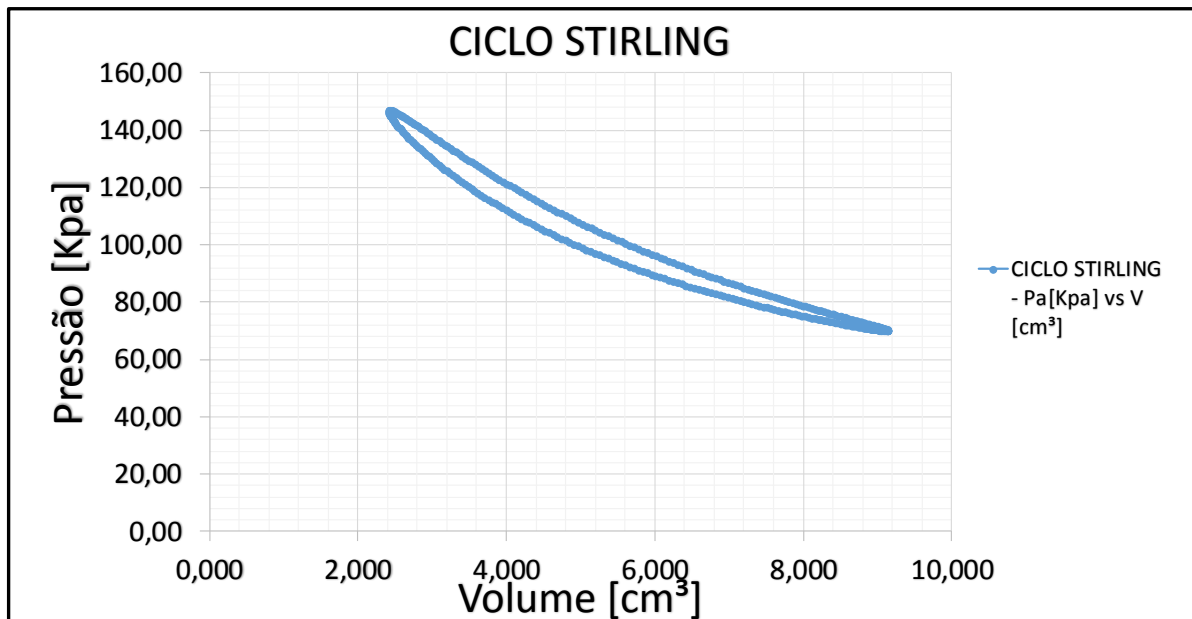
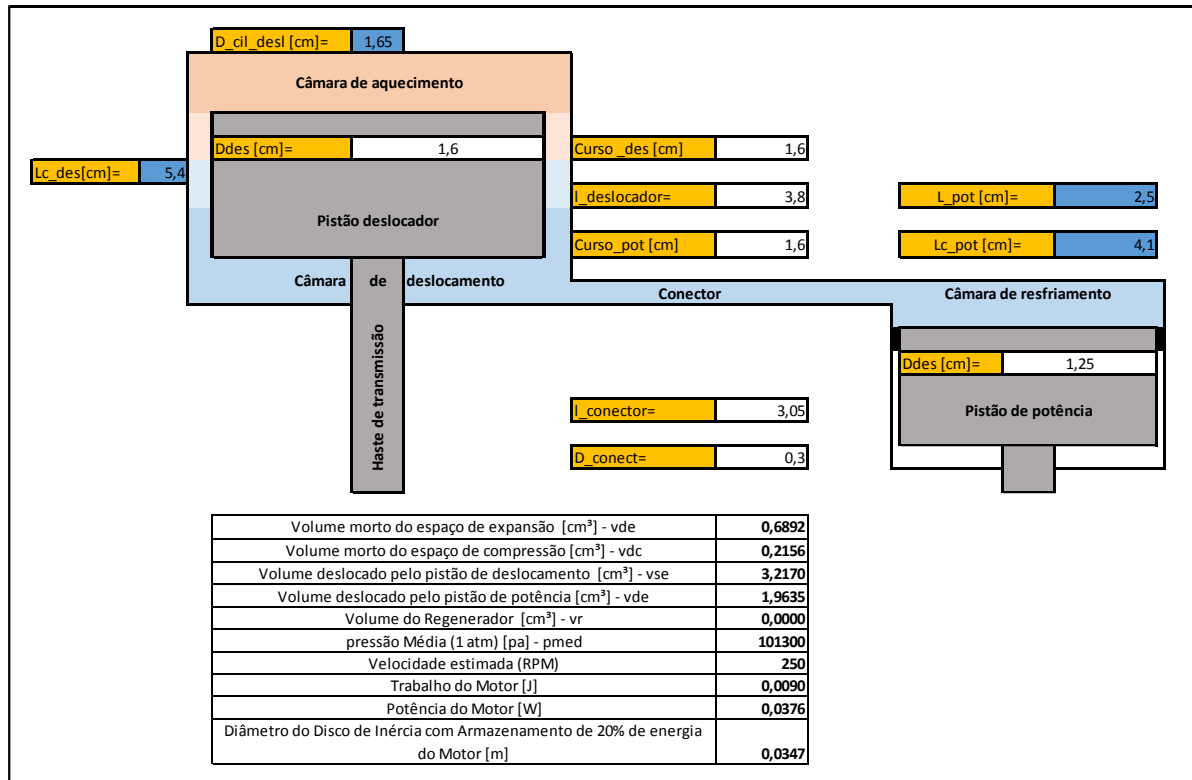


Figura 48: Cálculos dos valores de saída teóricos e plotagem do Ciclo Stirling.
Fonte: Adaptado de Pereira (2015).

APÊNDICE B – ANÁLISE DE VIABILIDADE DE ALETAMENTO

Nos cálculos da análise de viabilidade de aletamento das superfícies externas de troca de calor da câmara de deslocamento e da câmara de resfriamento, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- 1) Troca de calor em regime permanente;
- 2) Transferência de calor por convecção com extremidade adiabática;
- 3) Condução unidimensional de calor no sentido radial;
- 4) Propriedades constantes;
- 5) Troca de calor com a vizinhança por radiação desprezível.

As aletas foram dimensionadas no formato anular, conforme ilustrado na Figura 49 abaixo:

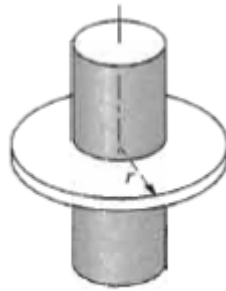


Figura 49: Aleta anular.

Fonte: Incropera; Dewitt et al. (2003)

A espessura t e o espaçamento S entre as aletas foram considerados os mínimos possíveis, de acordo com as limitações dos processos de fabricação utilizados.

Para o tipo anular, definem-se os parâmetros geométricos corrigidos, comprimento L_c e raio externo r_{2c} conforme a Figura 43 abaixo, de modo a considerar a troca de calor na superfície indicada em vermelho mesmo considerando extremidades adiabáticas (hipótese 2).

Dessa forma, considera-se essa superfície vermelha (Figura 50) como se fosse uma extensão das outras superfícies de cada aleta e assim equivale-se a transferência real de calor da aleta por convecção na extremidade com a transferência de calor em uma aleta longa hipotética com extremidade adiabática, em consonância com a hipótese 2.

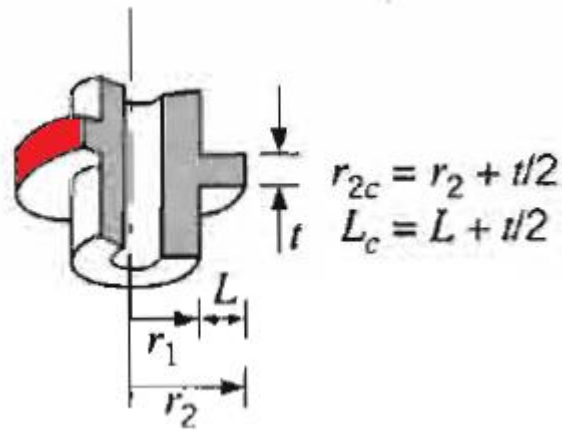


Figura 50: Parâmetros geométricos da aleta anular.

Essa consideração só é válida pois os erros associados a essa aproximação são desprezíveis quando $(h \cdot t/k) \leq 0,0625$ (INCROPERA; DEWITT et al., 2003). Assim sendo, o cálculo da quantidade de calor trocada pela superfície aletada q_a pode ser realizado de acordo com a equação 38 abaixo:

$$q_a = M \cdot \tanh(mL_c) \quad (23)$$

$$M = \sqrt{hPk\theta_b A_{c,b}} \quad (24)$$

$$m = \sqrt{hP/kA_{c,b}} \quad (25)$$

Incropera et al. define a efetividade de aleta de acordo com a seguinte equação:

$$\varepsilon_a = \frac{q_a}{hA_{c,b}\theta_b} \quad (26)$$

Os parâmetros dimensionais e de operação podem ser visualizados na Tabela 8 abaixo. A definição da sigla de cada parâmetro pode ser vista na página 10 (Simbologia).

Dessa forma, obtiveram-se eficiências ε_a de aproximadamente 0,55 e 0,30 para as câmaras de resfriamento e de deslocamento, respectivamente. Isso prova a inviabilidade do aletamento das superfícies de troca de calor dos componentes em questão na condição avaliada.

Vale ressaltar que o resultado dessa análise é específico para o dimensionamento e as condições de trabalho utilizadas no presente projeto, ou seja, é possível que o uso de aletas se mostre viável mediante alteração do dimensionamento e dos parâmetros de operação.

Tabela 12 – Parâmetros dimensionais e de operação

Câmara de resfriamento		Câmara de deslocamento	
Dimensões aletas		Dimensões aletas	
Aa	413,51 mm ²	Aa	1002,56 mm ²
Ac,b	80,11 mm ²	Ac,b	103,67 mm ²
P	73,83 mm	P	105,24 mm
r2c	11,75 mm	r2c	16,75 mm
r2	11,00 mm	r2	16,00 mm
r1	8,50 mm	r1	11,00 mm
L	2,50 mm	L	5,00 mm
Lc	3,25 mm	Lc	5,75 mm
t	1,50 mm	t	1,50 mm
S	1,60 mm	S	1,60 mm
N	9	N	9
At	4490,67 mm ²	At	10018,30 mm ²
Ab	769,06 mm ²	Ab	995,26 mm ²
k	186 W/m.K	k	186 W/m.K
Troca de calor aletas		Troca de calor aletas	
h	50 W/m ² .K	h	50 W/m ² .K
qa	0,24 W	qa	0,60 W
Tb	700 K	Tb	700 K
Tar	300 K	Tar	300 K
Tetab	400 K	Tetab	400 K
m	6,93	m	5,31
M	10,66	M	19,81
εa	0,14973 Inviável	εa	0,2917653 Inviável

APÊNDICE C – TEMPO, CUSTOS E PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO

O Apêndice C vai apresentar os parâmetros principais de fabricação envolvidos para a construção e otimização de cada componente do motor Stirling. Alguns desses parâmetros são importantes para o cálculo do custo total de fabricação do motor, como os tempos de fabricação (tempos de preparação e usinagem).

Com o conhecimento dos tempos principais e secundários de usinagem e do custo da hora-máquina para cada processo de fabricação, é possível estimar o quanto foi gasto com cada componente do motor Stirling tipo gama. A Tabela 13 reúne os principais parâmetros de fabricação utilizados. O custo da hora-máquina considerado foi de R\$50,00/ hora de fabricação, independente do processo utilizado.

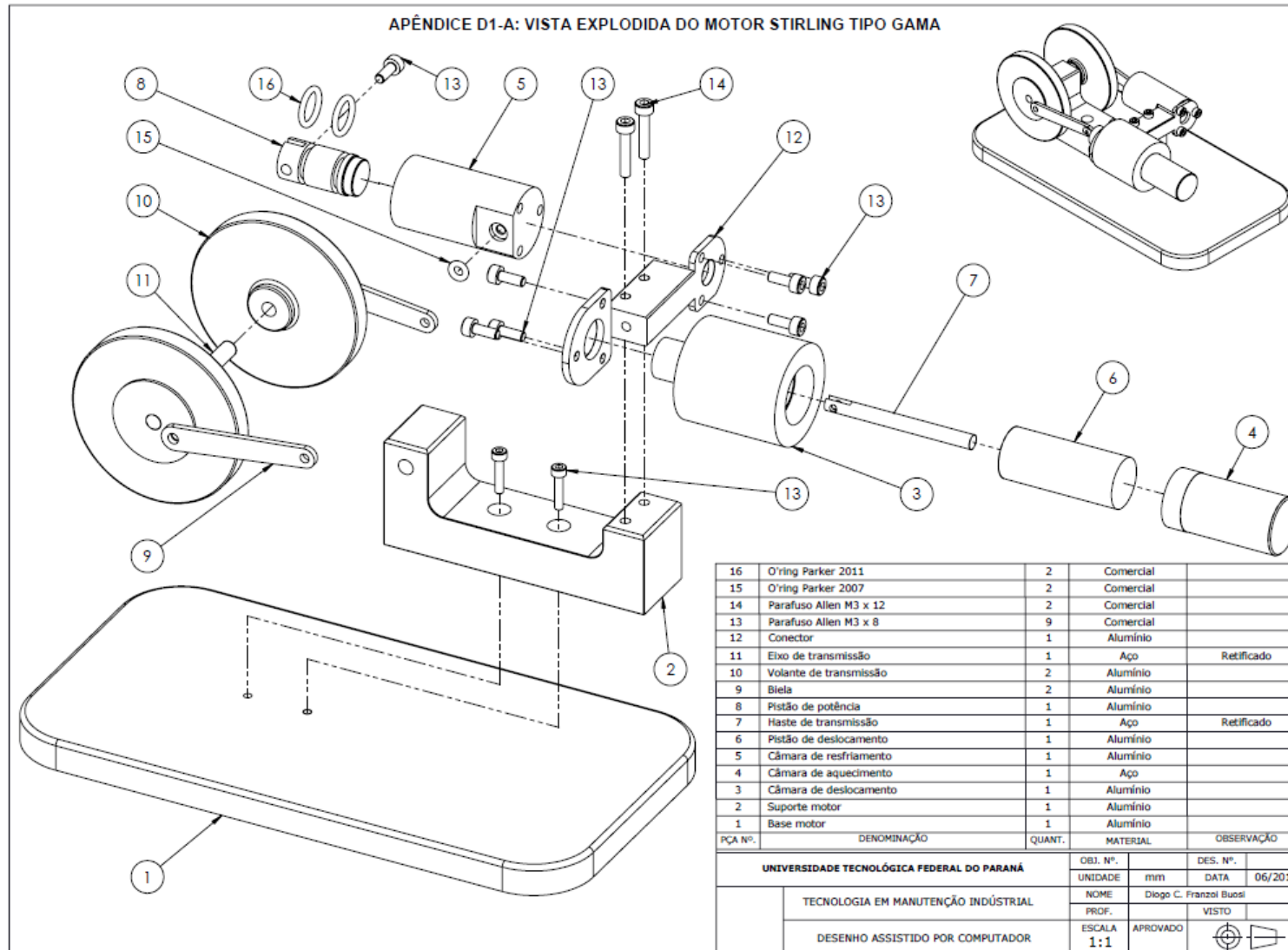
Tabela 13 – Parâmetros de fabricação

Peça N°	Componente	Material	Qtde.	Ferramenta	Máquina	Processo	Parâmetros				Tempo Total [min]
							Vc [m/min]	f [mm/volta]	ap [mm]	rpm	
1	Base Motor	Alumínio	1	Metal duro	Fresadora	Desbaste	42	-	1	1000	40
				Metal duro	Fresadora	Acabamento	-	-	-	-	
2	Suporte Motor	Alumínio	1	Metal duro	Fresadora	Desbaste	40	-	1	500	80
				Metal duro	Fresadora	Acabamento	38	-	-	1000	
3	Câmara de deslocamento	Alumínio	1	Metal duro	Torno	Desbaste	60	-	2	600	90
				Metal duro	Torno	Acabamento	100	0,1	0,5	1000	
				Metal duro	Fresadora	Desbaste	40	-	1	500	
				Metal duro	Fresadora	Furação	7,5	-	-	800	
4	Câmara de aquecimento	Aço Inox	2	Aço rápido	Torno	Desbaste	120	-	1	600	60
				Metal duro	Torno	Acabamento	130	0,1	0,3	800	
5	Câmara de resfriamento	Alumínio	1	Metal duro	Torno	Desbaste	42	-	2	600	90
				Metal duro	Torno	Acabamento	70	0,1	0,5	1000	
				Metal duro	Fresadora	Desbaste	40	-	1	500	
				Metal duro	Fresadora	Furação	7,5	-	-	800	
6	Pistão de deslocamento	Alumínio	1	Metal duro	Torno	Desbaste	30	-	1	600	40
				Metal duro	Torno	Acabamento	50	0,1	0,3	1000	
				Metal duro	Fresadora	Furação	-	-	-	800	

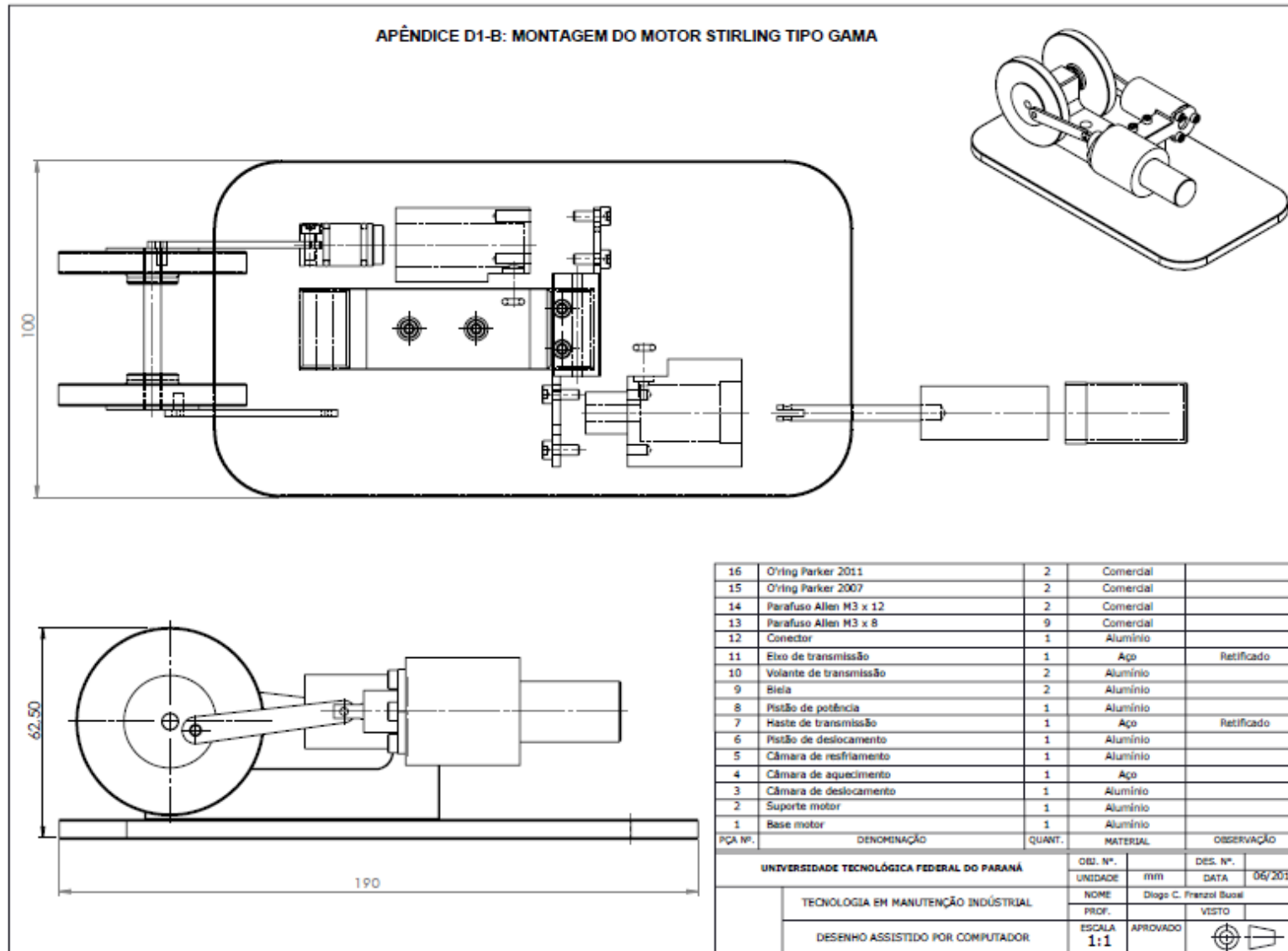
Peça N°	Componente	Material	Qtde.	Ferramenta	Máquina	Processo	Parâmetros				Tempo Total [min]
							Vc [m/min]	f [mm/volta]	ap [mm]	rpm	
7	Haste de transmissão	Aço Retificado	1	Cerâmica	Serra	Desbaste	47	-	-	300	40
				Aço rápido	Fresadora	Furação	-	-	-	1500	
8	Pisão de potência	Alumínio	1	Metal duro	Torno	Desbaste	30	-	1	800	120
				Metal duro	Torno	Acabamento	38	0,1	0,3	1000	
				Metal duro	Fresadora	Furação	-	-	-	800	
9	Biela	Alumínio	2	Metal duro	Fresadora	Desbaste	40	-	1	800	60
				Metal duro	Fresadora	Furação	-	-	-	800	
10	Volante de transmissão	Alumínio	2	Metal duro	Torno	Desbaste	88	-	2	500	90
				Aço rápido	Torno	Acabamento	120	0,1	0,5	800	
				Metal duro	Fresadora	Furação	-	-	-	800	
11	Eixo de transmissão	Aço Retificado	1	Óxido de Al	Rebolo	Desbaste	-	-	-	20	
12	Conector	Alumínio	1	Metal duro	Fresadora	Desbaste	40	-	1	500	120
				Metal duro	Fresadora	Acabamento	35	-	-	1000	
				Metal duro	Fresadora	Furação	-	-	-	800	
Ajustes para otimização do motor Stirling											
13	Alívio de peso Pistão deslocador	Alumínio	1	Metal duro	Fresadora	Desbaste	30	-	-	400	40
				Metal duro	Fresadora	Acabamento	50	-	-	1000	
14	Aletamento da câmara de deslocamento	Alumínio	1	Metal duro	Torno	Desbaste	20	-	-	300	80
				Metal duro	Torno	Acabamento	65	-	-	800	
15	Bucha de bronze grafitado	Bronze grafitado	1	Aço rápido	Torno	Desbaste	35	-	1	1000	40
				Aço rápido	Fresadora	Furação	7,5	-	-	500	
				Aço rápido	Fresadora	Alargador	-	-	-	100	
16	Câmara de resfriamento	Ferro fundido	1	Metal duro	Torno	Desbaste	42	-	2	600	90
				Metal duro	Torno	Acabamento	70	0,1	0,5	1000	
				Metal duro	Fresadora	Desbaste	40	-	1	500	
				Metal duro	Fresadora	Furação	7,5	-	-	800	
17	Pisão de potência	Ferro fundido	1	Metal duro	Torno	Desbaste	30	-	1	800	30
				Metal duro	Torno	Acabamento	38	0,1	0,3	1000	
				Metal duro	Fresadora	Furação	-	-	-	800	

Resumidamente, foi empregado aço rápido para brocas e machos de rosca, e metal duro para usinagem interna e externa.

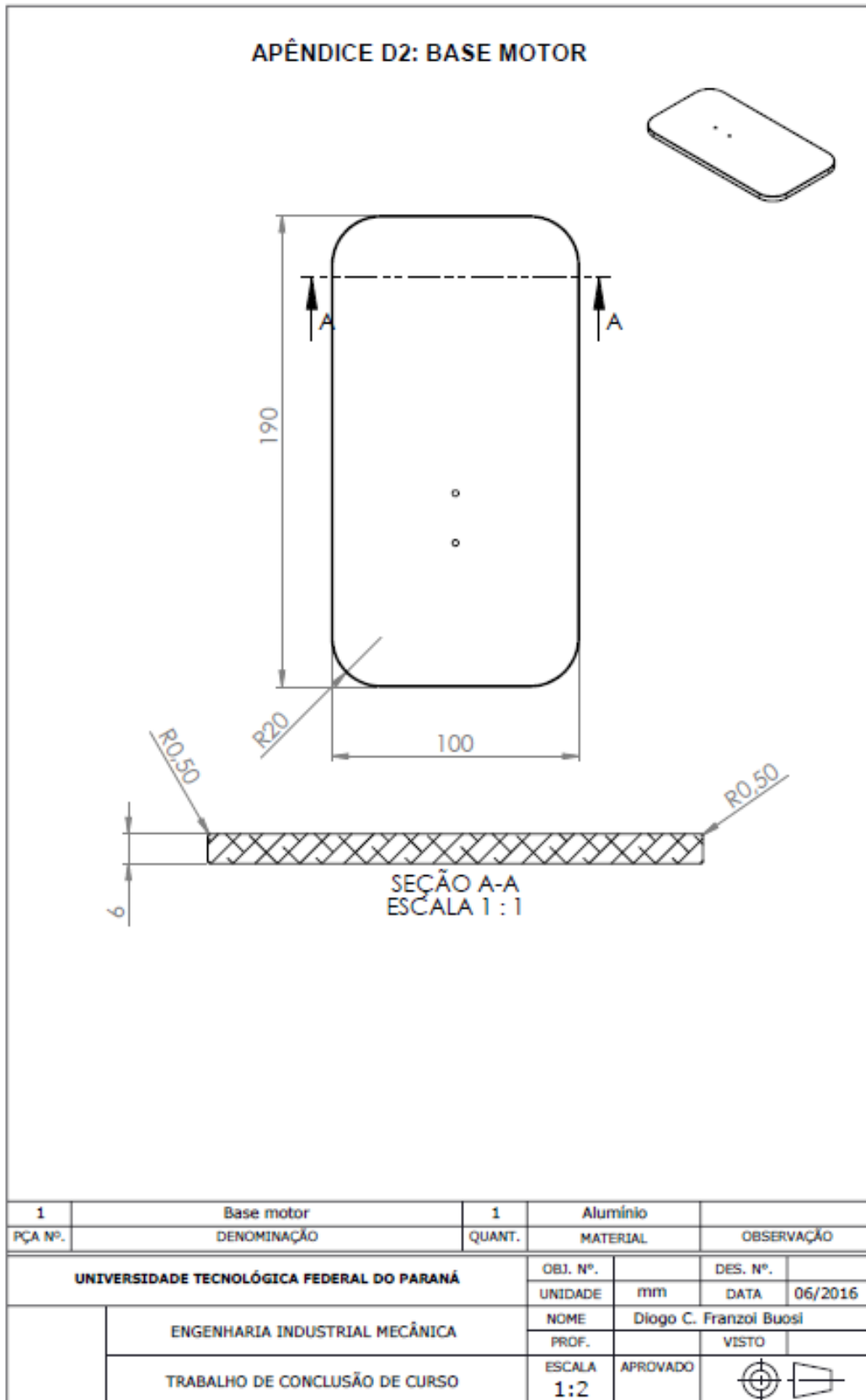
APÊNDICE D1-A – VISTA EXPLODIDA DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA



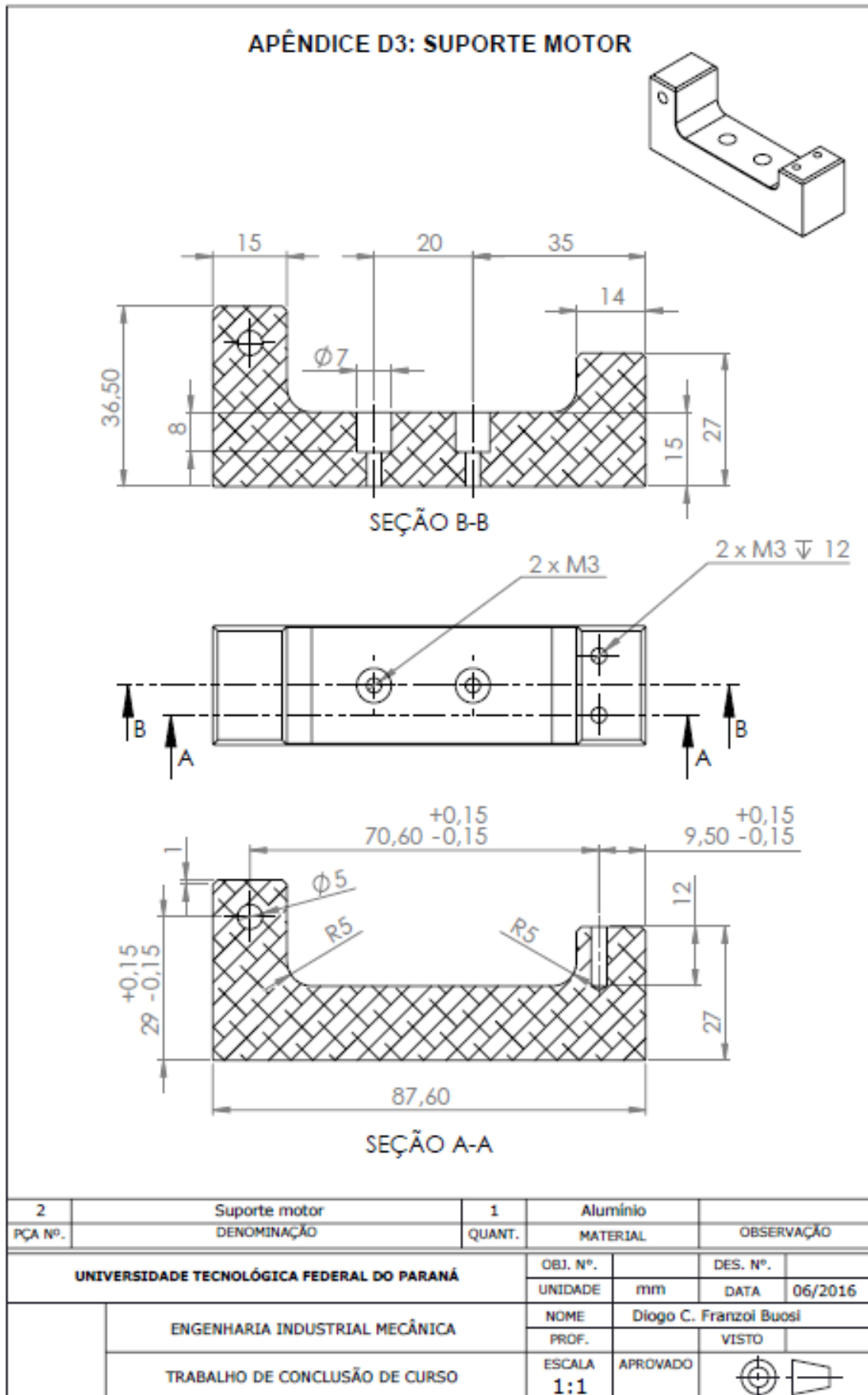
APÊNDICE D1-B – MONTAGEM DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA



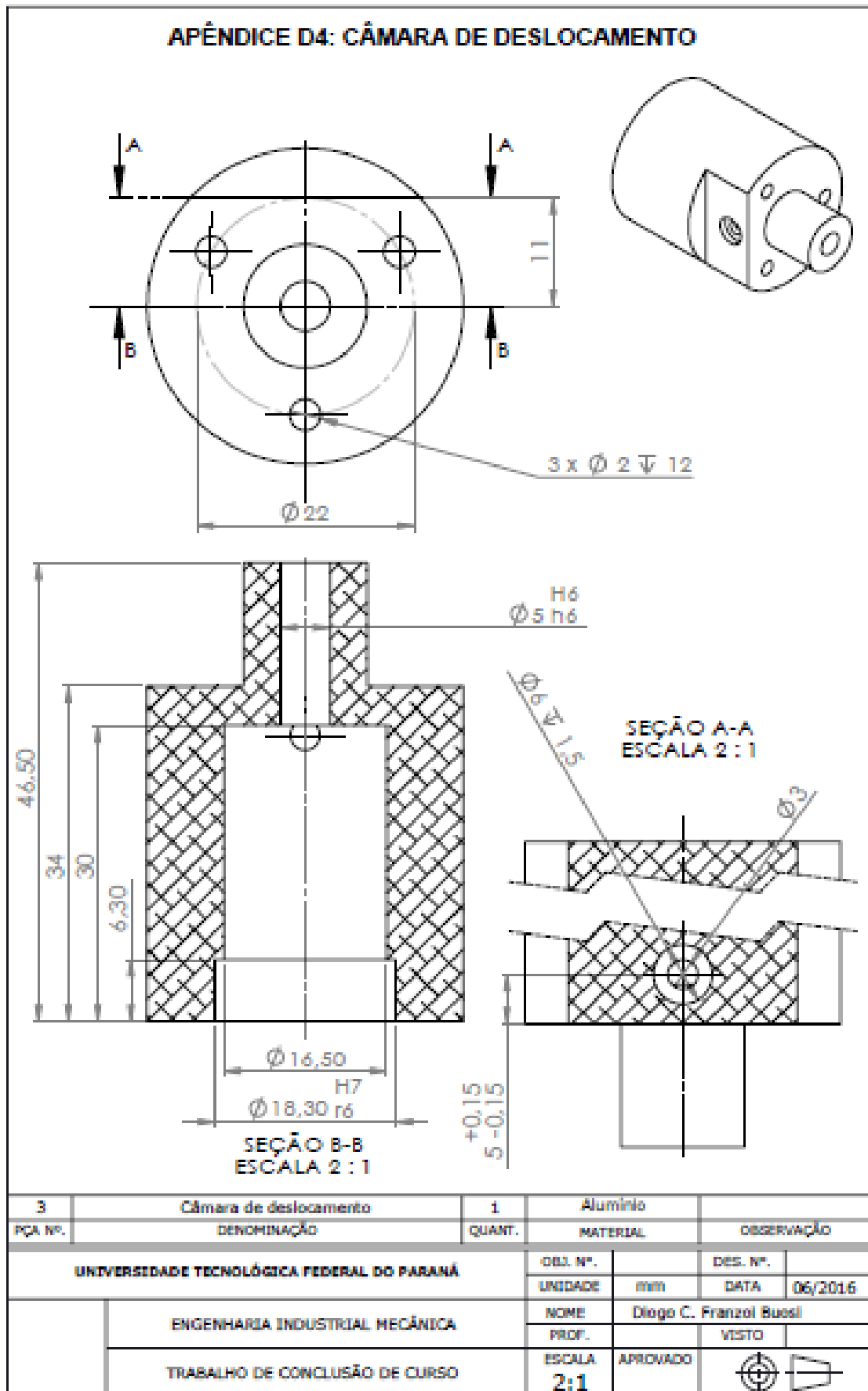
APÊNDICE D2 – BASE MOTOR



APÊNDICE D3 – SUPORTE MOTOR

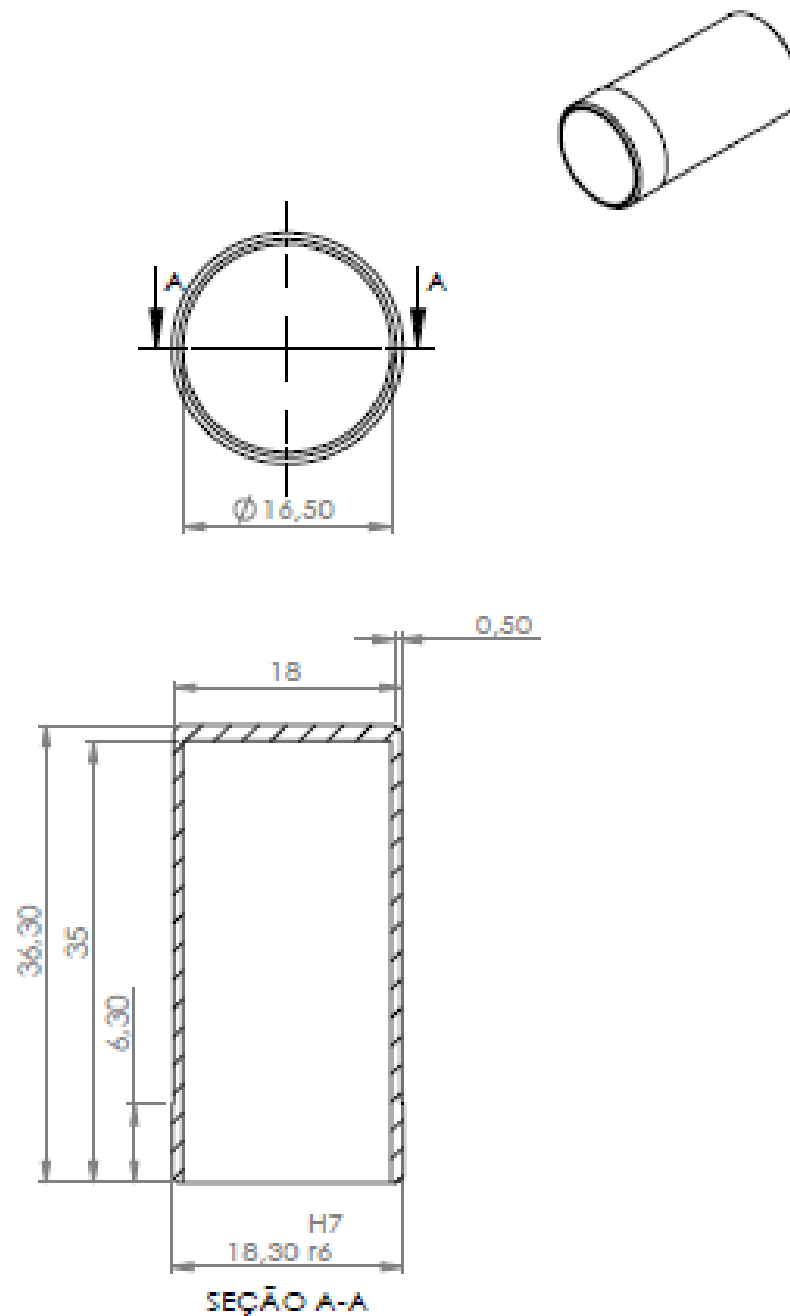


APÊNDICE D4 – CÂMARA DE DESLOCAMENTO



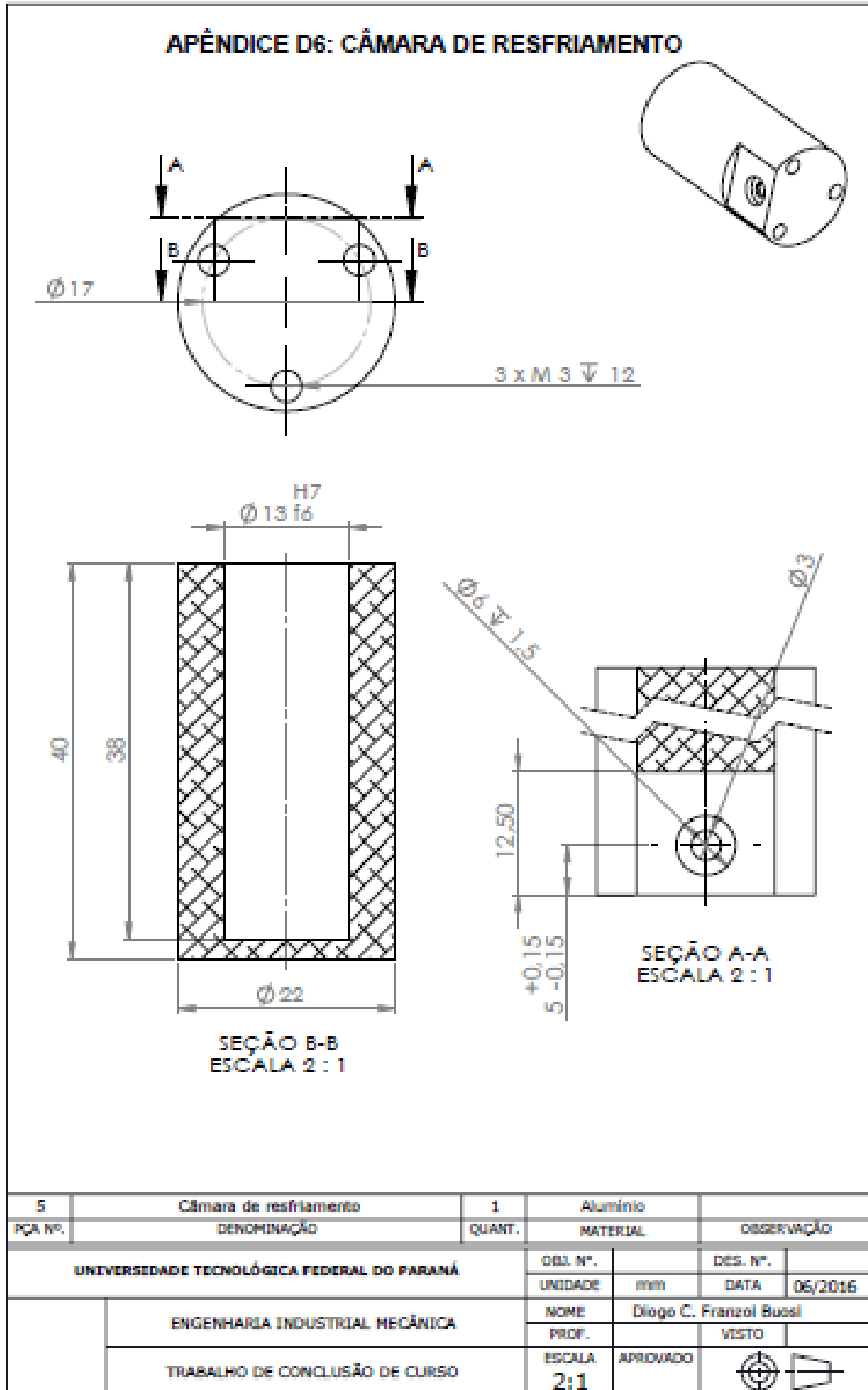
APÊNDICE D5 – CÂMARA DE AQUECIMENTO

APÊNDICE D5: CÂMARA DE AQUECIMENTO



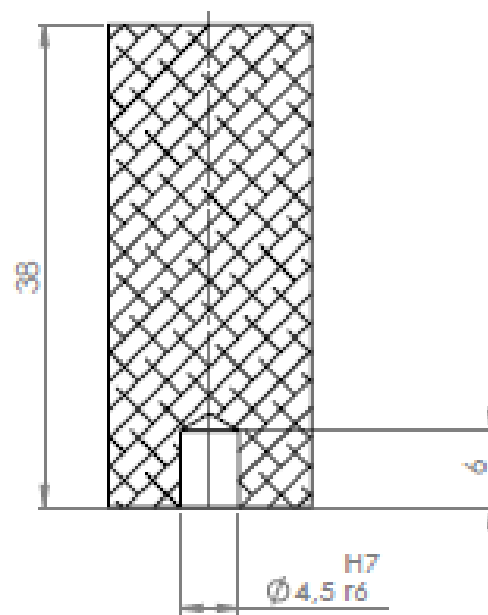
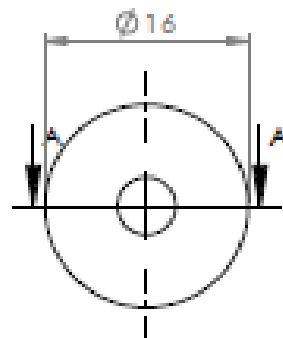
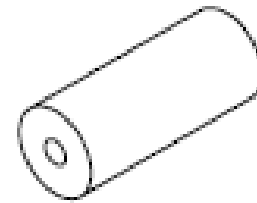
4	Câmara de aquecimento	1	Aço		
PÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO	
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			OBJ. Nº.	DES. Nº.	
			UNIDADE	DATA	06/2016
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzoi Bussi	
			PROF.	VISTO	
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			ESCALA	APROVADO	
			2:1		

APÊNDICE D6 – CÂMARA DE RESFRIAMENTO



APÊNDICE D7 – PISTÃO DESLOCADOR

APÊNDICE D7: PISTÃO DESLOCADOR

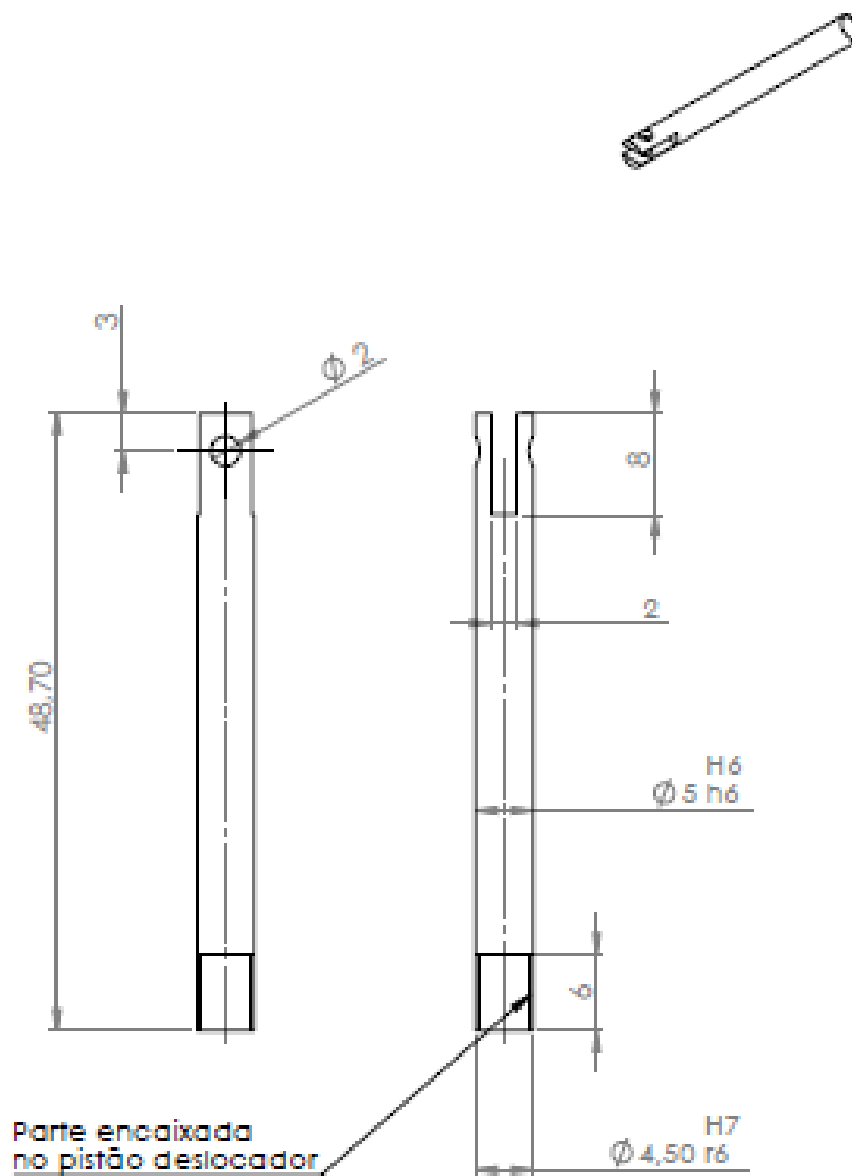


SEÇÃO A-A

6	Pistão deslocador	1	Alumínio	observação	
PÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL		
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			OBJ. Nº.	DES. Nº.	
			UNIDADE	DATA	06/2016
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzoi Buesi	
			PROF.	VISTO	
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			ESCALA	APROVADO	
			2:1		

APÊNDICE D8 – HASTE DE TRANSMISSÃO

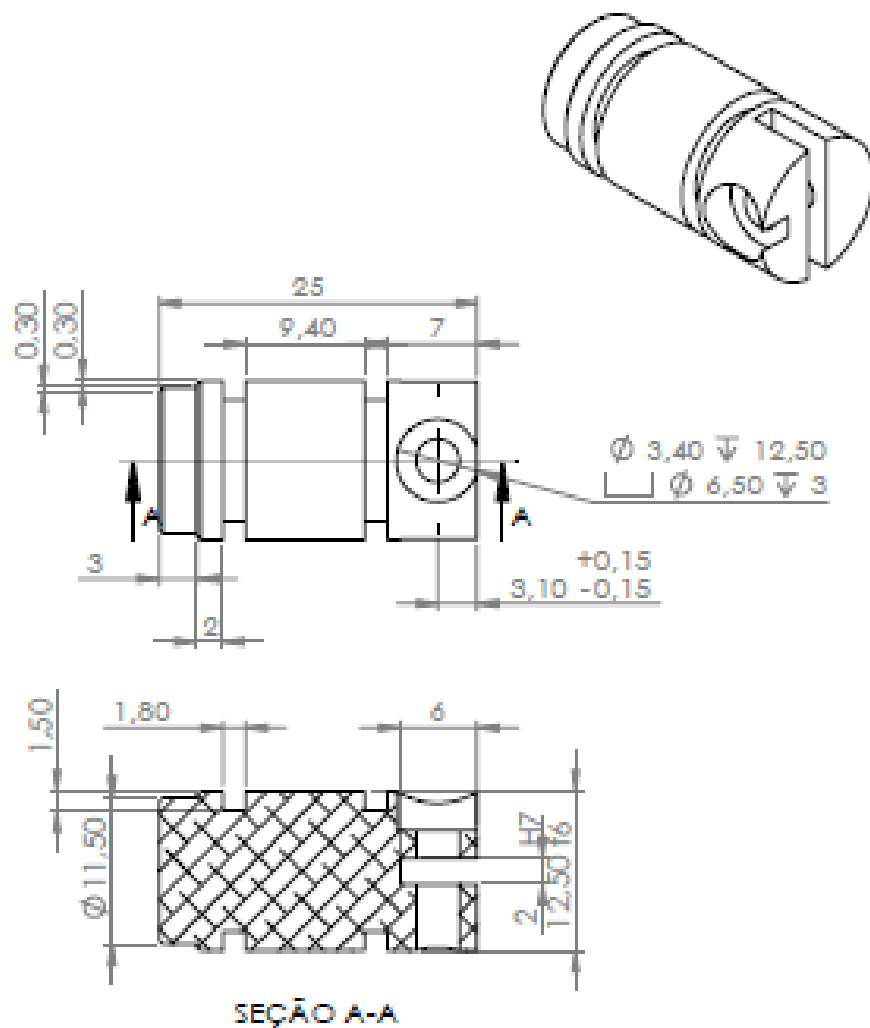
APÊNDICE D8: HASTE DE TRANSMISSÃO



7	Haste de transmissão	1	Aço retificado	Comercial
PÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			OBJ. Nº.	DES. Nº.
			UNIDADE	DATA
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzol Bussi
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			PROF.	VISTO
			ESCALA	APROVADO
			2:1	

APÊNDICE D9 – PISTÃO DE POTÊNCIA

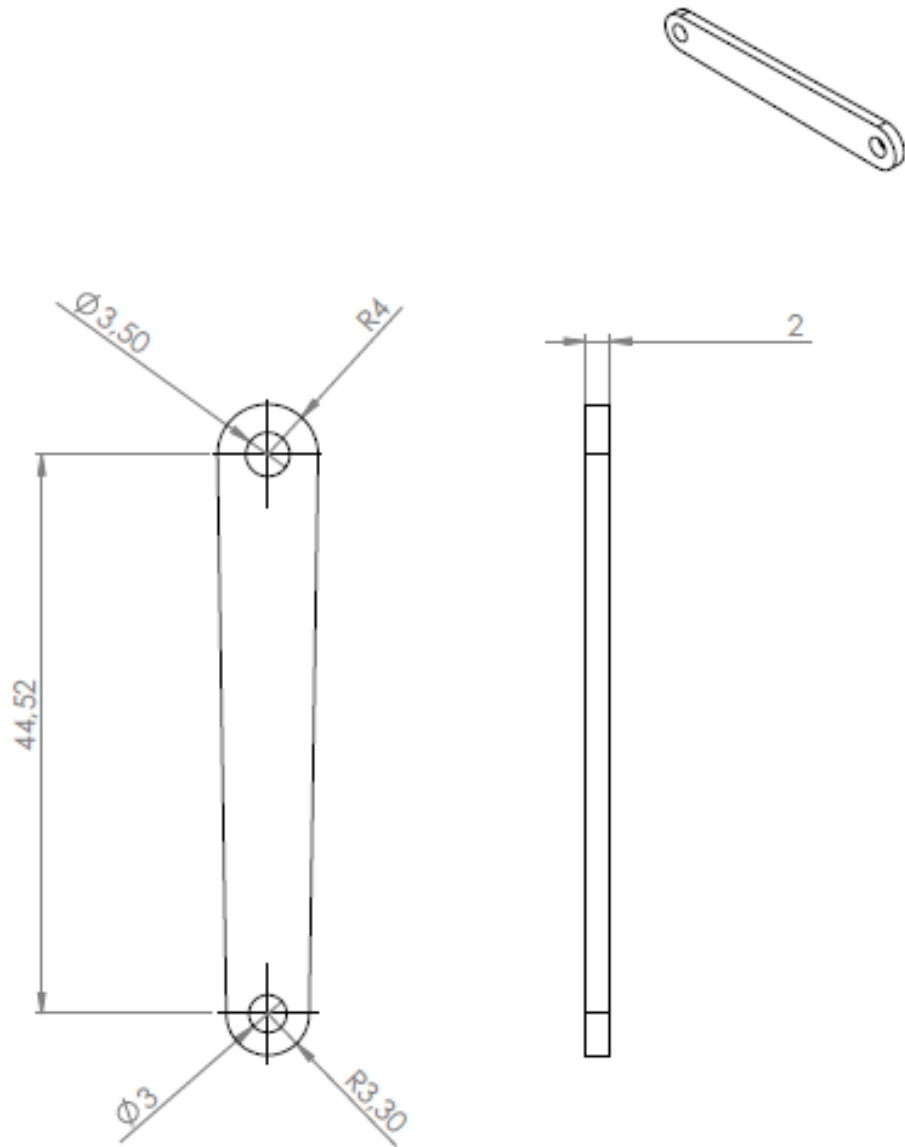
APÊNDICE D9: PISTÃO DE POTÊNCIA



8	Pistão de potência	1	Alumínio		
PÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO	
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			OBJ. Nº.	DES. Nº.	
			UNIDADE	DATA	06/2016
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzoi Bussal	
			PROF.	VISTO	
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			ESCALA	APROVADO	
			2:1		

APÊNDICE D10 – BIELA

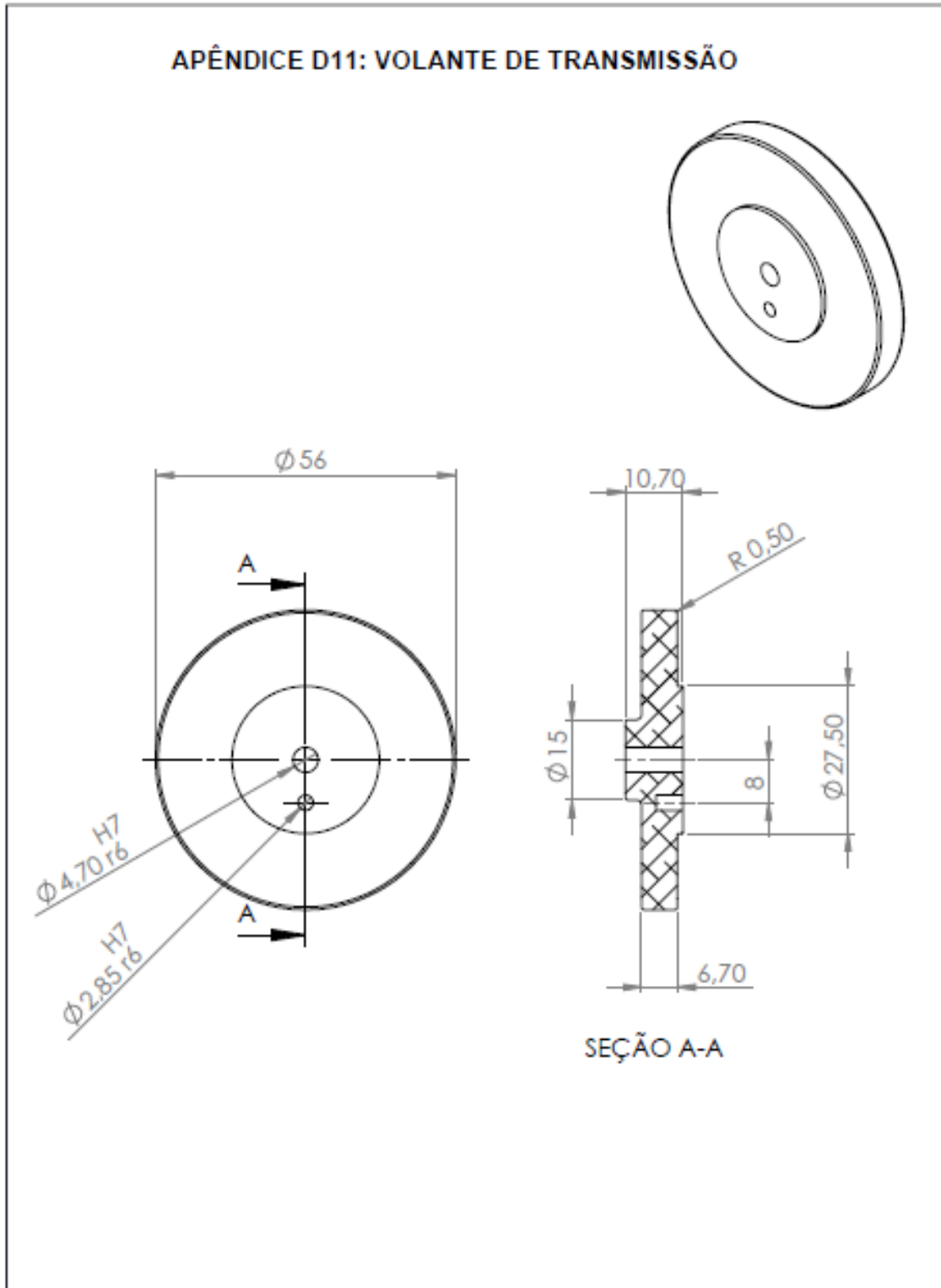
APÊNDICE D10: BIELA



9	Bielas	2	Alumínio		
RÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO	
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			OBJ. Nº.	DES. Nº.	
			UNIDADE	mm	DATA 06/2016
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzoi Buosi	
			PROF.		VISTO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			ESCALA 2:1	APROVADO	

APÊNDICE D11 – VOLANTE DE TRANSMISSÃO

APÊNDICE D11: VOLANTE DE TRANSMISSÃO

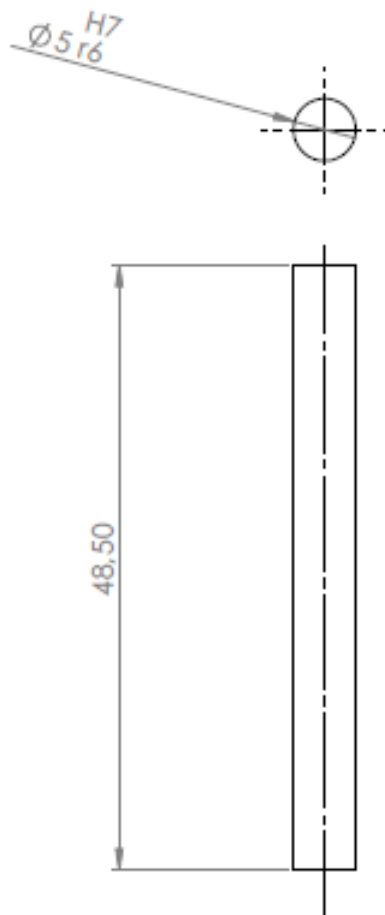


SEÇÃO A-A

10	Volante de transmissão	2	Alumínio	
PÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			OBJ. Nº.	DES. Nº.
			UNIDADE	mm DATA 06/2016
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzoi Buosi
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			PROF.	VISTO
			ESCALA 1:1	APROVADO

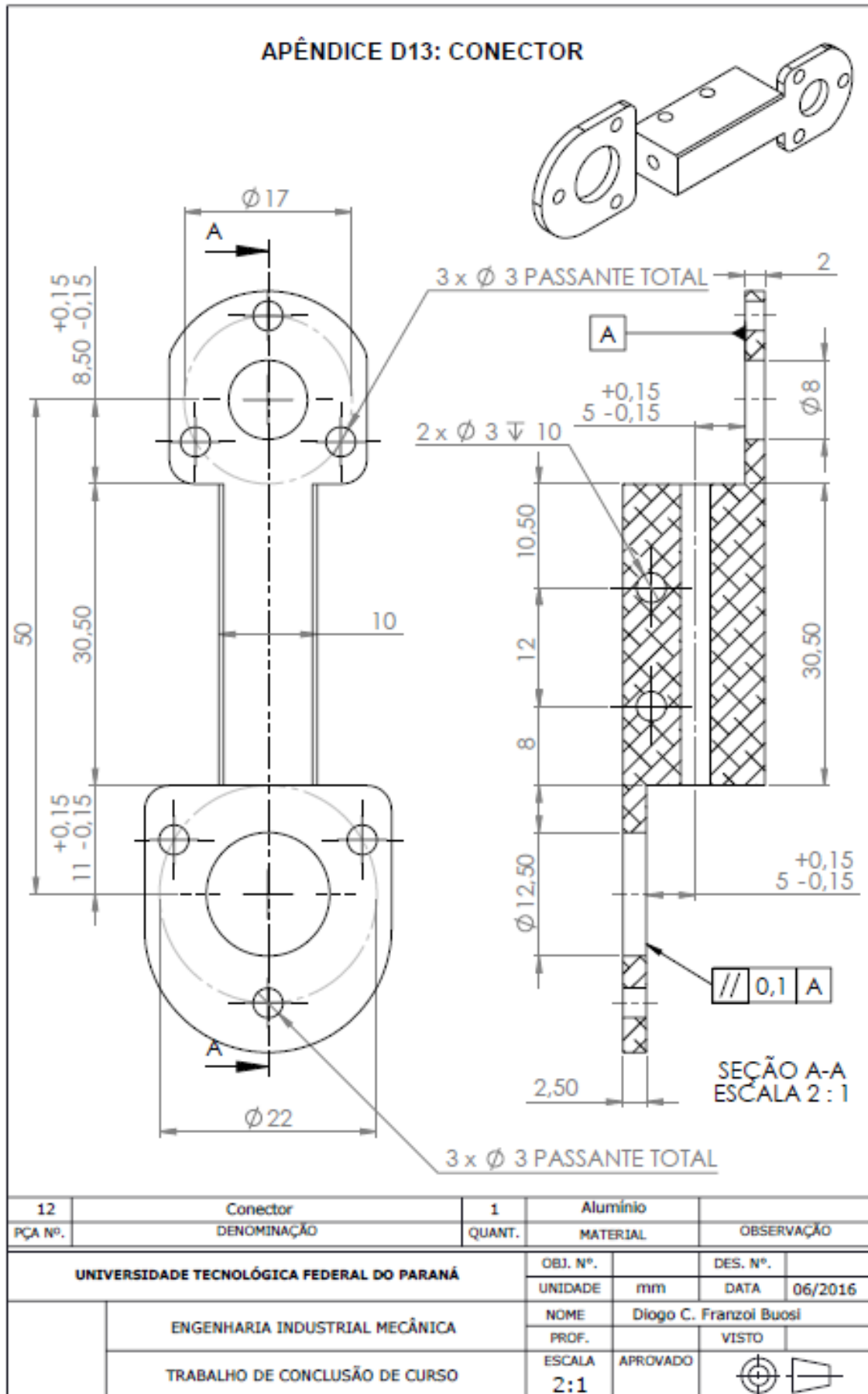
APÊNDICE D12 – EIXO DE TRANSMISSÃO

APÊNDICE D12: EIXO DE TRANSMISSÃO

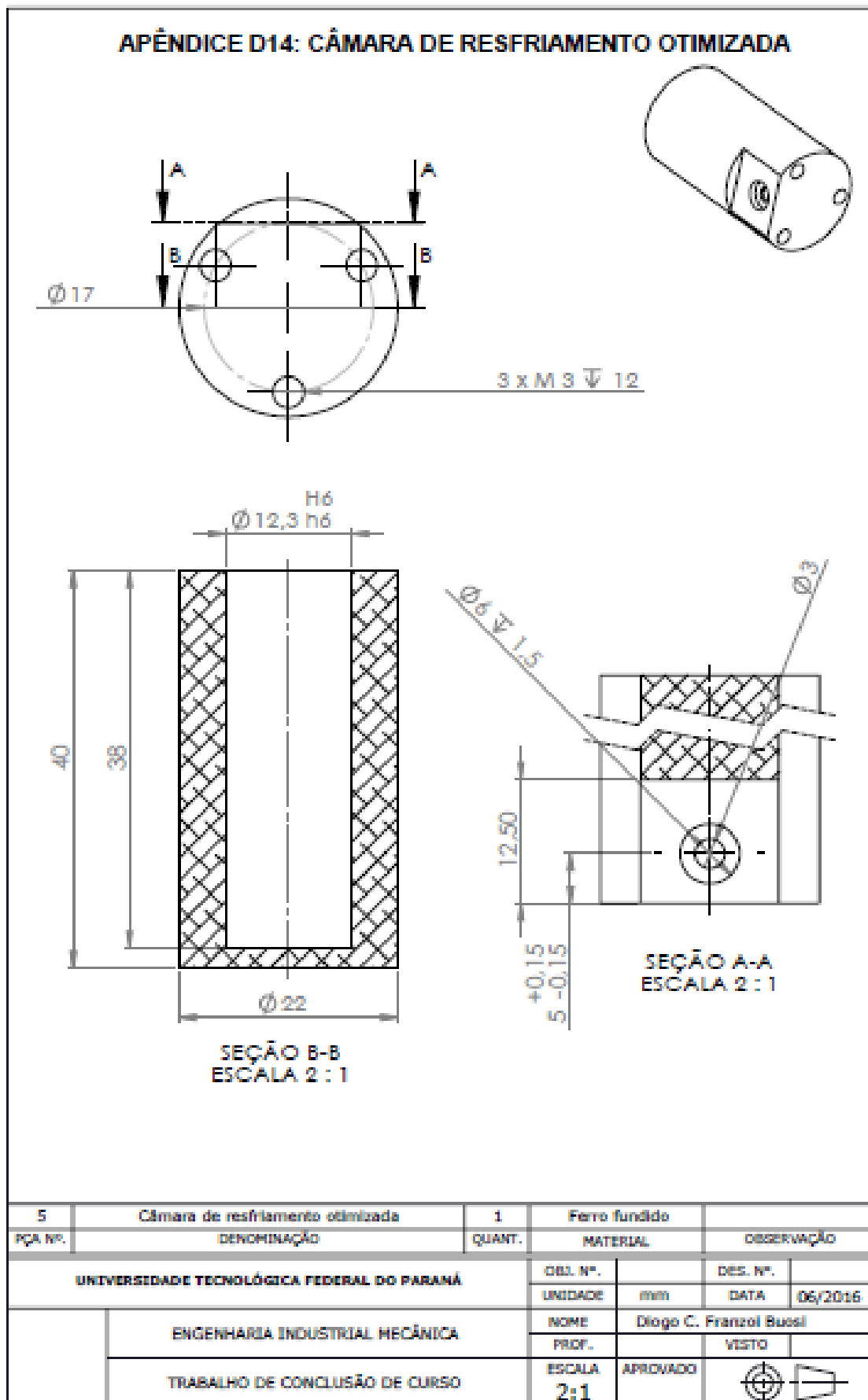


10	Eixo de transmissão	1	Aço retificado	Comercial
PÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			OBJ. Nº.	DES. Nº.
			UNIDADE	DATA
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzoi Buosi
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			PROF.	VISTO
			ESCALA	APROVADO
			2:1	

APÊNDICE D13 – CONECTOR

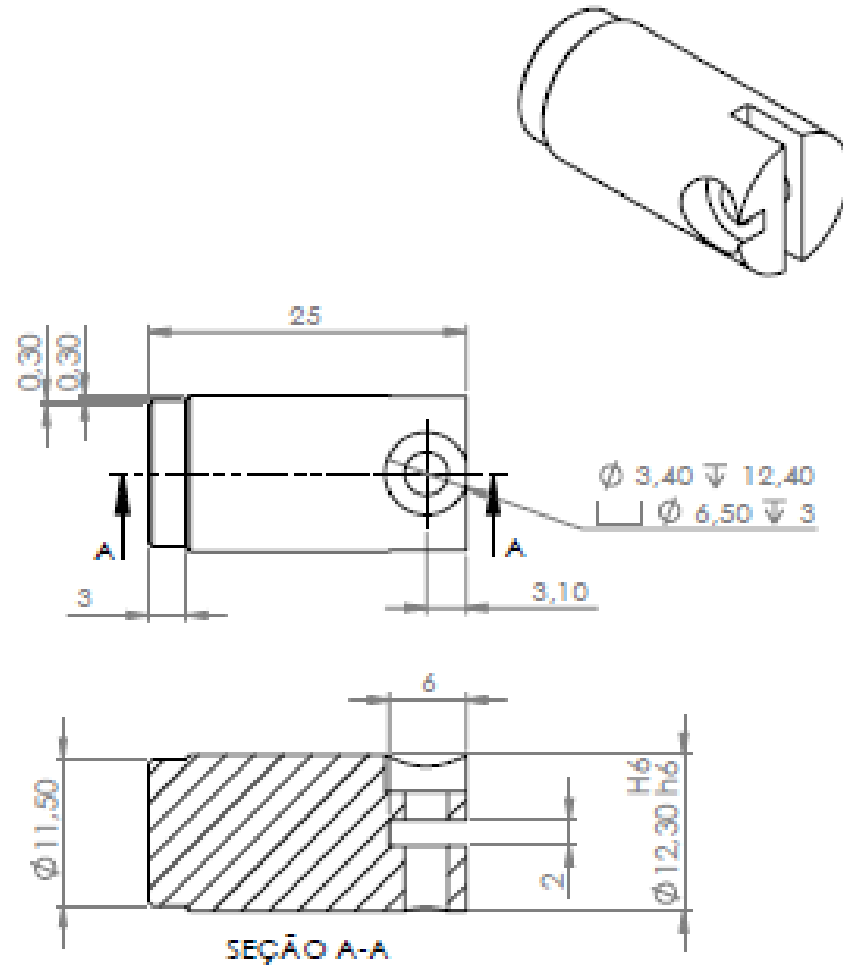


APÊNDICE D14 – CÂMARA DE RESFRIAMENTO OTIMIZADA



APÊNDICE D15 – PISTÃO DE POTÊNCIA OTIMIZADO

APÊNDICE D15: PISTÃO DE POTÊNCIA OTIMIZADO



8	Pistão de potência otimizado	1	Ferro fundido		
PÇA Nº.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO	
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			DEL. Nº.	DES. Nº.	
			UNIDADE	DATA	06/2016
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA			NOME	Diogo C. Franzoi Buesi	
			PROF.	VISTO	
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			ESCALA	APROVADO	
			2:1		