

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

LUIZ GUILHERME BREDAS DUARTE
MARCEL TOLEDO
THIAGO WESLEY DE OLIVEIRA

**CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO MOTOR STIRLING**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

LUIZ GUILHERME BREDAS DUARTE
MARCEL TOLEDO
THIAGO WESLLEY DE OLIVEIRA

CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO MOTOR STIRLING

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial dos Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alexandre de Faria

CURITIBA
2013

LUIZ GUILHERME BREDA DUARTE
MARCEL TOLEDO
THIAGO WESLLEY DE OLIVEIRA

CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO MOTOR STIRLING

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 20 de março de 2013, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os alunos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Milton Luiz Polli
Coordenador de Curso
Departamento Acadêmico de Mecânica

Prof. Dr. Décio Estevão do Nascimento
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso

BANCA EXAMINADORA

Curitiba, 20 de março de 2013

Prof. Ednilson Wichinescki
UTFPR

Prof. Zely da Conceição
UTFPR

Prof. Dr. Rubens Alexandre de Faria
Orientador - UTFPR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

Aos nossos pais, que de forma tão carinhosa contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, sempre incentivando e investindo seu tempo a fim compartilhar suas experiências conosco.

AGRADECIMENTOS

A Deus por proporcionar grandes oportunidades em nossas vidas, nos concedendo sua benção e iluminando nossos caminhos e mentes para alcançarmos mais uma conquista.

Ao nosso Orientador, Prof. Dr. Rubens Alexandre de Faria, pelos ensinamentos tão valiosos, paciência e dedicação.

Ao Professor MSc. Christian Strobel e ao Técnico Mecânico Adriano, pelos trabalhos realizados em conjunto durante o desenvolvimento do protótipo.

Aos irmãos e pessoas especiais, Mayara Breda Duarte, Tatiane Toledo, David Willian de Oliveira, Tuanny Hellen de Oliveira, Jéssica Melo, Letícia Moreira e Manuella L. Pereira, pelo companheirismo, amizade, colaboração e conforto nos momentos de dificuldade.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, representada pelos seus Professores e Funcionários, pela oportunidade de utilizar os recursos ali disponibilizados a fim de permitir a realização deste trabalho.

RESUMO

DUARTE, Luiz G. B.; TOLEDO; Marcel; OLIVEIRA; Thiago W. **Conversão de Energia Térmica em Energia Elétrica utilizando Motor Stirling**, 2013. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Tecnologia em Mecatrônica Industrial), Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Analisando o cenário mundial, nota-se que o desenvolvimento está diretamente ligado a oferta de energia. Porém, a medida que se avança na busca por fontes energéticas, enfrenta-se a delicada questão de preservação ambiental. O desenvolvimento de tecnologias capazes de preservar os recursos naturais é um dos principais desafios da engenharia. Este trabalho se insere neste contexto, pois apresenta um protótipo capaz de gerar energia elétrica, a partir de qualquer sistema em que haja energia calorífica sendo dissipada. Considerando uma câmara de combustão pré-definida, foram avaliadas as características físicas do mesmo para posteriormente modelar, detalhar e fabricar o protótipo. O motor foi testado com o objetivo de comprovar na prática a sua funcionalidade e, através da análise do seu rendimento, foi possível certificar sua viabilidade como solução para a geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Motor de Stirling. Geração de Energia. Análise de Rendimento. Motor Gama. Motor de Combustão Externa.

ABSTRACT

DUARTE, Luiz G. B.; TOLEDO; Marcel; OLIVEIRA; Thiago W. **Conversion of Thermal Energy to Electrical Energy using Stirling Engine**. 2013, 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Tecnologia em Mecatrônica Industrial), Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Analysing the world situation, it's noted that the development is linked to the energy offer. Although, along with the search for energy sources, is necessary to deal with the environmental preservation. The development of technologies able to preserve the natural resources is one of the main challenges that engineering is facing. This paper presents a prototype able to produce electrical energy, using any system that has thermic energy being dissipated. With a pre-establish combustion chamber, the engine's physical characteristics were analyzed in order to project the prototype. The engine was tested due to comprove its functionality. The efficiency could be analyzed in order to certified it's viability as solution for electrical energy generation as a non-pollution process.

Keywords: Stirling Engine. Electrical Energy Generation. Efficiency Analysis, Gama Engine. External Combustion Engine.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODELO ORIGINAL POR ROBERT STIRLING	10
FIGURA 2 - CICLO DE CARNOT	19
FIGURA 3 - CICLO STIRLING	20
FIGURA 4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR TIPO ALFA.....	21
FIGURA 5 - PRINCÍPIO DE TRABALHO DO MOTOR STIRLING TIPO BETA	23
FIGURA 6 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR TIPO GAMA.....	24
FIGURA 7 – ESBOÇO DO MOTOR TIPO GAMA	26
FIGURA 8 – CÂMARA DE EXPANSÃO	27
FIGURA 9 – CÂMARA DE COMPRESSÃO	28
FIGURA 10 – EIXO DE TRANSMISSÃO	28
FIGURA 11 – BASE DE APOIO	29
FIGURA 12 – PROTÓTIPO DO MOTOR STIRLING.....	29
FIGURA 13 – BASE DE APOIO REVISADA.....	34
FIGURA 14 – EIXO DE TRANSMISSÃO REVISADA	34
FIGURA 15 – PROTÓTIPO DO MOTOR REVISADO.....	35
FIGURA 16 - TABELA DE PODER CALORÍFICO DOS GASES	38
FIGURA 17 – ESQUEMA ELÉTRICO PARA MEDIÇÃO	39
FIGURA 18 – MEDIÇÃO DA TENSÃO NO RESISTOR	40

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFIA 1 – MOTOR ORIGINAL POR JOHN ERICSSON.....	17
FOTOGRAFIA 2 - MOTOR STIRLING PHILIPS MP1002CA DE 1951	18
FOTOGRAFIA 3 - PRÉ-MONTAGEM DO MOTOR STIRLING	30
FOTOGRAFIA 4 – TESTE DO NOVO PROTÓTIPO.....	36
FOTOGRAFIA 6 – PESAGEM APÓS 60 SEGUNDOS	38
FOTOGRAFIA 5 – PESAGEM INICIAL.....	38
FOTOGRAFIA 6 – PESAGEM APÓS 60 SEGUNDOS	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	PROBLEMA	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	METODOLOGIA	13
1.4.1.	Levantamento de Dados	13
1.4.2.	Projeto do Motor	13
1.4.3.	Fabricação do Motor	14
1.4.4.	Testes e Análise de Resultados	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1.	MOTOR STIRLING	16
2.1.1.	Histórico	17
2.1.2.	Ciclo Termodinâmico de Carnot	19
2.1.3.	Princípio de Funcionamento	20
2.1.4.	Tipos de Motores	21
2.1.4.1.	Tipo alfa	21
2.1.4.2.	Tipo beta	22
2.1.4.3.	Tipo gama	24
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	26
3.1	DEFINIÇÃO DO MODELO PRÁTICO	26
3.2	MODELAMENTO E DETALHAMENTO DO PROTÓTIPO	27
3.3	FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO	30
4	TESTES E RESULTADOS	32
4.1	DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS	32
4.2	ANÁLISE DO PROTÓTIPO	32
4.2.1	Análise do Projeto Inicial	32
4.2.2	Melhoria de Projeto e Análise	33
4.3	EFICIÊNCIA DO PROTÓTIPO	36
4.3.1	Cálculo da Potência Térmica do Maçarico de Butano	37
4.3.2	Medição dos parâmetros para Cálculo da Potência Fornecida através do Motor DC	39
4.3.3	Rendimento do Sistema	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
5.1.	CONCLUSÃO	42
5.2.	PERSPECTIVA DE TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICES A – MONTAGEM FINAL DO MOTOR STIRLING	46
	APÊNDICES B – BASE PRINCIPAL	47
	APÊNDICES C – CÂMARA DE EXPANSÃO	48
	APÊNDICES D – CÂMARA DE RESFRIAMENTO	49
	APÊNDICES E – TUBO DE CONEXÃO	50
	APÊNDICES F – PISTÃO DE EXPANSÃO	51
	APÊNDICES G – PISTÃO DE RESFRIAMENTO	52
	APÊNDICES H – HASTE DE TRANSMISSÃO	53

APÊNDICES I – DISCO DE TRANSMISSÃO.....	54
APÊNDICES J – POLIA	55
APÊNDICES K – EIXO DE TRANSMISSÃO.....	56

1 INTRODUÇÃO

O consumo crescente de energia criou uma nova barreira para o desenvolvimento tecnológico. Com o aumento das discussões em torno dos impactos ambientais decorrentes da utilização das fontes convencionais de geração de energia, é necessário buscar processos capazes de aliar o máximo aproveitamento dos recursos disponibilizados e desenvolvimento sustentável.

Conforme apresentado por Barros (2005, p.33),

Com a crise energética ocorrida em 2001, devido aos baixos níveis dos reservatórios de água das principais centrais hidrelétricas do país, o governo passou a incentivar outras formas de geração elétrica, tais como as centrais termelétricas, e além disso as fontes alternativas de geração de energia, compreendendo a chamada energia renovável, sendo criados programas, como o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.

Com isto, o aproveitamento de energia dissipada de outros processos, bem como a otimização do gerenciamento dos recursos naturais, torna atrativa a possibilidade da utilização do motor de Stirling na geração de energia elétrica. “Esta tecnologia foi desenvolvida e apresentada pelo escocês Robert Stirling em 1816 com o objetivo de substituir os motores a vapor” (BARROS, 2005, p. 23). A figura (1) ilustra o motor desenvolvido por Robert Stirling.

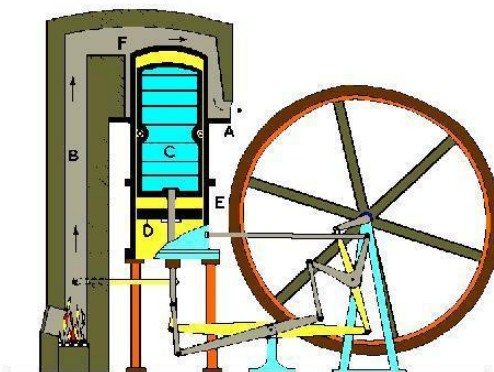


Figura 1 - Modelo original por Robert Stirling
Fonte: Barros (2005, p. 24)

Ao realizar um estudo aprofundado do seu funcionamento, rendimento e capacidade de se agregar a outros sistemas, observa-se que, por se tratar de um sistema que trabalha a partir da energia calorífica, sua aplicabilidade se torna vasta.

Existem atividades humanas que têm por característica gerar algum tipo de impacto negativo para o meio ambiente. A obtenção de energia elétrica a partir das usinas hidrelétricas, não foge a regra.

De acordo com a Conservação Internacional Brasil (2010),

A hidrelétrica de Belo Monte propõe o barramento do rio Xingu com a construção de dois canais que desviarão o leito original do rio, com escavações da ordem de grandeza comparáveis ao canal do Panamá (200 milhões m³) e área de alagamento de 516 km², o equivalente a um terço da cidade de São Paulo.

Como apresentado, a concepção de matrizes energéticas baseadas em grandes empreendimentos que por consequência afetam de maneira negativa determinados territórios vem sendo muito discutidas, portanto o que se propõe como possível solução consiste na geração de energia a partir de meios diversos e descentralizados.

É comum o desenvolvimento de novas tecnologias conforme as necessidades, neste âmbito os motores de Stirling podem ser um resgate do passado adaptado às necessidades do presente. Baseado nisto, a utilização dos mesmos para a geração de energia elétrica, pode ser uma saída sustentável capaz de suprir a demanda energética gerada pelo crescimento global.

1.1 PROBLEMA

Macedo (2002) expõe que o desenvolvimento está diretamente ligado à oferta de energia. Porém, à medida que se avança na busca por fontes energéticas, enfrenta-se a delicada questão de preservação ambiental.

A emissão de gases poluentes provenientes das usinas termoelétricas e utilização dos motores a combustão interna, bem como os impactos negativos resultantes da implantação de usinas hidrelétricas (alagamento de áreas produtivas, desequilíbrio dos ecossistemas, etc), são um estímulo para a busca por fontes energéticas de menor escala, bem como não poluentes ou com impactos ambientais mínimos, por serem capazes de se adaptar aos recursos já existentes e não aproveitados.

Neste âmbito, o motor de Stirling se enquadra perfeitamente, pois é capaz de aproveitar o calor proveniente de inúmeras fontes térmicas.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de tecnologias capazes de preservar os recursos naturais é um dos principais desafios da engenharia. Este trabalho se insere neste contexto, pois, ao utilizar um motor de Stirling para geração de energia elétrica, sabe-se que o mesmo pode ser adaptado em qualquer sistema em que haja energia calorífica sendo dissipada. Portanto, a principal justificativa do trabalho é demonstrar a capacidade de seu uso como uma fonte co-geradora de energia elétrica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é construir uma planta capaz de converter energia térmica em energia elétrica, utilizando motor Stirling.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Gerar as especificações técnicas de um protótipo de conversão de energia térmica em energia elétrica.
- Projetar em sistema de CAD-3D a concepção escolhida.
- Realizar a simulação virtual do sistema.
- Fabricar o protótipo.
- Testar o protótipo.
- Analisar os resultados.

1.4 METODOLOGIA

1.4.1. Levantamento de Dados

Primeiramente serão analisadas as mais diversas bibliografias existentes, a fim de determinar qual o modelo de motor Stirling mais apropriado para o desenvolvimento do modelo prático. Também será necessário realizar o levantamento dos parâmetros de *input* (quantidade de calor, volume de trabalho do motor, potência mecânica teórica na saída do motor) para dar início ao projeto do motor.

1.4.2. Projeto do Motor

Nesta etapa será concebido o modelo tridimensional do motor, de forma a permitir, que o mesmo seja detalhado para que na sequência seja executada a fabricação.

A escolha do motor elétrico do tipo DC será definida a partir dos valores encontrados na medida da potência mecânica do motor.

1.4.3. Fabricação do Motor

A fim de permitir um melhor rendimento e durabilidade, serão utilizados materiais que aliam uma boa resistência mecânica, boa usinabilidade e um baixo coeficiente de condutividade térmica (a exceção do regenerador). Tratando-se de um modelo didático, é conveniente que se opte por um motor de pequena escala.

1.4.4. Testes e Análise de Resultados

Após a conclusão de todos os processos anteriormente citados, será possível realizar a medição dos resultados gerados pelo modelo prático e compará-lo com o modelo teórico a fim de determinar uma razão entre os mesmos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho segue as etapas descritas a seguir:

1. Introdução
2. Revisão de literatura
3. Definição do Problema
4. Desenvolvimento do Projeto
5. Implementação e Análise
6. Conclusão
7. Referências Bibliográficas

8. Anexos

O mesmo foi estruturado de maneira a facilitar a compreensão e análise do assunto. O capítulo 1 - Introdução, descreve superficialmente o assunto abordado, constando de justificativa, objetivos geral e específico além dos resultados esperados.

O capítulo 2 - Revisão de literatura - tem como objetivo abordar os assuntos tratados no trabalho, além de citações a respeito de componentes utilizados no projeto.

No capítulo 3 - Definição do Problema - é necessária uma avaliação minuciosa a fim de listar os pontos principais que devem ser seguidos com o objetivo de atingir os resultados esperados.

O desenvolvimento do projeto, capítulo 4, apresenta de forma detalhada todos os passos percorridos durante a realização do mesmo.

A análise dos resultados alcançados a partir do protótipo desenvolvido pode ser visualizada no capítulo 5.

E o capítulo 6 - Conclusão, conta com as conclusões obtidas tanto do experimento, quando de todo o trabalho, em virtude do desenvolvimento do mesmo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. MOTOR STIRLING

Ao longo dos anos, vários estudos têm sido realizados a fim de investigar o comportamento dos diferentes tipos de motores Stirling. Ao analisar os trabalhos desenvolvidos, fica evidente que a simplicidade, rendimento e segurança dos mesmos, são pontos de grande interesse entre os autores. Inúmeros experimentos têm procurado desenvolver alternativas para a co-geração de energia a partir da utilização dos motores Stirling.

Silva (2001, p.15) apresenta uma maneira de fabricar um motor de Stirling, a partir dos princípios de expansão do êmbolo com ar quente e de compressão do contra êmbolo com ar frio. Para sua fabricação foram utilizados componentes facilmente encontrados no dia-a-dia. Por fim analisa os pontos fortes e os pontos fracos do projeto, indicando, os erros e as medidas tomadas para as correções, totais ou parciais.

Roxo (2007, p.11) desenvolveu um projeto de coletores solares de disco parabólico, os quais geram energia elétrica a partir de um motor Stirling ligado a um gerador. Este projeto serve como base metodológica para a confecção de uma planilha que generaliza o método de cálculo e permite obter o dimensionamento dos equipamentos em questão para qualquer demanda de potência elétrica, bem como para qualquer irradiação solar média local. Por fim, realiza-se uma análise de viabilidade econômica dos equipamentos.

Rossetin et al. (2010, p. 89) apresentam uma planilha de cálculo, em *excel*, capaz de simular através da teoria, a potência e eficiência dos motores de Stirling.

2.1.1. Histórico

De acordo com Barros (2005), durante a Revolução Industrial as máquinas a vapor surgiram como uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento do processo produtivo. No entanto, sua aplicação esbarrava nas limitações tecnológicas da época. A fim de contornar este obstáculo, em 1816, Robert Stirling propõe a utilização de um novo conceito de Motor de ciclo fechado.

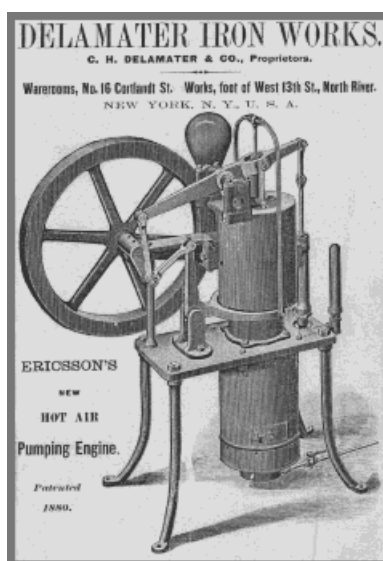
Conforme apresentado por Finkelstein e Organ (2001 apud BARROS, 2005, p.22),

Em motores de ciclo fechado, enquanto o fluido de trabalho é aquecida em uma parte do motor, em outra parte, este mesmo fluido pode ser simultaneamente resfriado. Portanto, o processo não é simples de ser entendido. A invenção de um motor de combustão externa de ciclo fechado por Robert Stirling em 1816 foi provavelmente uma das mais espetaculares invenções feitas pelo homem. Este esteve tão avançado cientificamente na época que pelo menos 30 anos se passaram sem quem ninguém pudesse entender o funcionamento do motor por completo.

Hirata (1995 apud BARROS, 2005, p.23) descreve que,

O auge na produção de motores Stirling ocorreu graças ao John Ericsson, um engenheiro e inventor sueco. Ele obteve sucesso fabricando um motor Stirling prático, sendo vendidos umas 2000 unidades, numa faixa entre 0,5 a 5 hp, por volta de 1850 na Inglaterra e nos Estados Unidos.

O primeiro motor desenvolvido por John Ericsson pode ser visualizado na fotografia (1).



Fotografia 1 – Motor original por John Ericsson
Fonte: Stirling Engines (2012)

Depois disso, vários motores Stirling foram feitos com maiores potências e eficiências. Entretanto, a capacidade dos motores produzidos neste período eram inferiores se comparados aos motores Otto e Diesel. O motor Otto foi inventado em 1877 e o motor diesel em 1893 (HIRATA, 1995).

Barros (2005 apud MARTINI, 1983, p.23) expõe que por muitos anos durante o último século, os motores Stirling ocuparam um papel relativamente pouco importante entre os tipos de motores usados durante este período. São geralmente chamados de motor a ar e são caracterizados pela alta confiabilidade e segurança, porém baixa potência específica. Quando comparados com outras máquinas, perdiam na relação US\$/hp. Na década de 30, pesquisadores da Philips Company, na Holanda, reconheceram várias possibilidades neste antigo motor, e perceberam que modernas técnicas de engenharia poderiam ser aplicadas, conforme apresentado na fotografia (2). Desde então, esta companhia tem investido milhões de dólares, criando uma posição de destaque na tecnologia de motores Stirling. Os desenvolvimentos realizados geraram motores com bom funcionamento, silenciosos, com elevada eficiência e possibilidade de usar qualquer fonte de calor.



Fotografia 2 - Motor Stirling Philips MP1002CA de 1951

Fonte: Deutsches Museum (2012)

2.1.2. Ciclo Termodinâmico de Carnot

Idealizado pelo engenheiro francês Sadi Carnot, a máquina de Carnot estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas. O rendimento de um motor ideal, baseado neste ciclo, é o máximo que uma máquina térmica trabalhando entre dadas temperaturas de fonte quente e fonte fria poderia alcançar (ROSSETIN et al, 2010, p. 17).

Funcionando entre duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas alternadamente, permite menor perda de energia (calor) para o meio externo (fonte fria).

A figura (2) representa o funcionamento do Ciclo Termodinâmico de Carnot, com suas diversas fases.

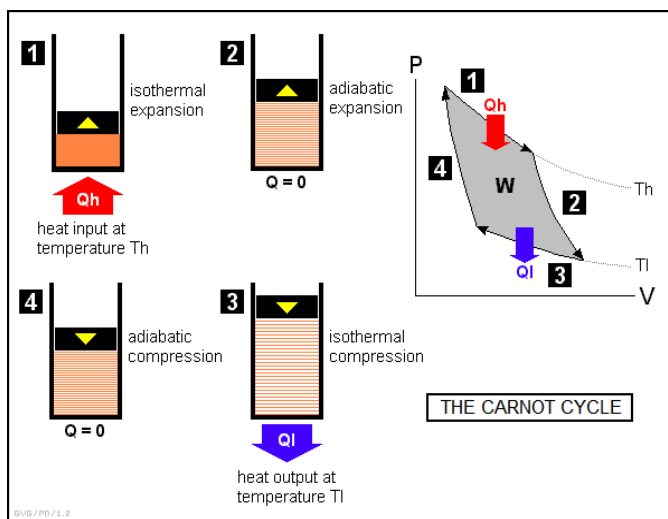


Figura 2 - Ciclo de Carnot
Fonte: Rossetin et al. (2010, p. 18)

Onde:

- 1 – Expansão isotérmica (troca de calor com fonte quente)
- 2 – Expansão adiabática (sem troca de calor com o meio externo)
- 3 – Compressão isotérmica (calor é rejeitado)
- 4 – Compressão isotérmica (sem troca de calor com o meio externo)

2.1.3. Princípio de Funcionamento

Como dito anteriormente, a máquina de Carnot apresenta um ciclo ideal, onde a energia do processo de aquecimento do fluido é, em teoria, totalmente transformado em trabalho, no entanto, seu desenvolvimento prático não foi possível.

Neste sentido, esta foi a referência utilizada para se desenvolver o ciclo Stirling, conforme apresentado na figura (3) e, por consequência, criar o motor Stirling.

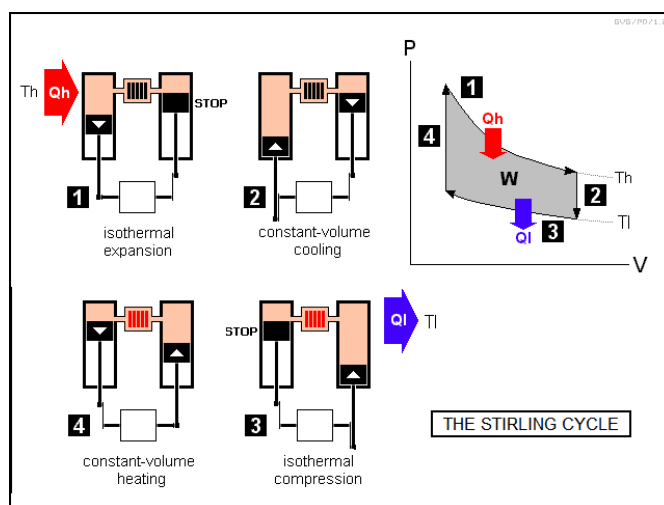


Figura 3 - Ciclo Stirling
Fonte: Rossetin et al. (2010, p. 18)

Rossetin et al. (2005, p. 75) descrevem que ao contrário dos motores convencionais (combustão interna), o motor Stirling se caracteriza por gerar potência a partir do aquecimento e resfriamento do gás de trabalho, presente no interior do motor, através de um agente de combustão externa. Este gás de trabalho é deslocado da parte fria para a parte quente, e vice-versa, através da movimentação dos pistões, que somado a variação da sua temperatura e alteração de pressão, gera força aos mesmos e por consequência transmitem potência ao eixo.

Silva (2001, p.4) apresenta a lei dos gases ideais conforme equação (1):

$$PV = nRT, \quad (1)$$

Onde: T - temperatura

P - pressão

V - volume

n - número de mols

R - constante universal dos gases

Ou seja, todo ciclo termodinâmico envolve transformações com a variação de uma destas três grandezas fundamentais dos gases.

2.1.4. Tipos de Motores

Barros (2005, p.28) descreve que os motores Stirling são diferenciados pelo número e forma como os pistões estão dispostos. Neste sentido, existem basicamente três tipos de motores:

2.1.4.1. Tipo alfa

O motor Stirling tipo Alfa, conforme figura (4), caracteriza-se pela defasagem em 90° entre os pistões de compressão e de expansão.

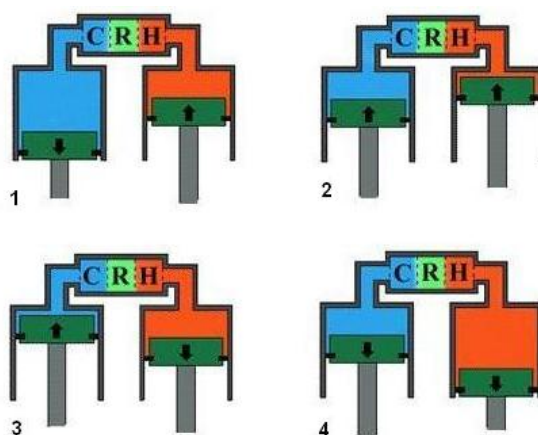


Figura 4 - Princípio de Funcionamento do Motor Tipo Alfa
Fonte: Barros (2005, p. 31)

Portanto:

1 para 2 - Compressão Isotérmica: Nesta etapa, tanto o pistão de compressão quanto o de expansão deslocam-se para cima, comprimindo o fluido de trabalho, ao mesmo tempo em que o calor é rejeitado para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante;

2 para 3 - Aquecimento a volume constante: O pistão de compressão atinge seu ponto máximo superior, o tempo que o pistão de expansão se movimenta para baixo. Desta maneira, o fluido de trabalho passa para o espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa e, por consequência, aumentando a pressão;

3 para 4 - Expansão Isotérmica: Tanto o pistão de compressão quanto o de expansão, se movem para baixo, expandindo o fluido e realizando trabalho a temperatura constante. Durante a expansão, o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;

4 para 1 - Rejeição de calor a volume constante: O pistão de compressão atinge seu ponto máximo inferior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para cima.

2.1.4.2. Tipo beta

O motor Stirling tipo Beta trabalha seguindo o ciclo ilustrado na figura (5):

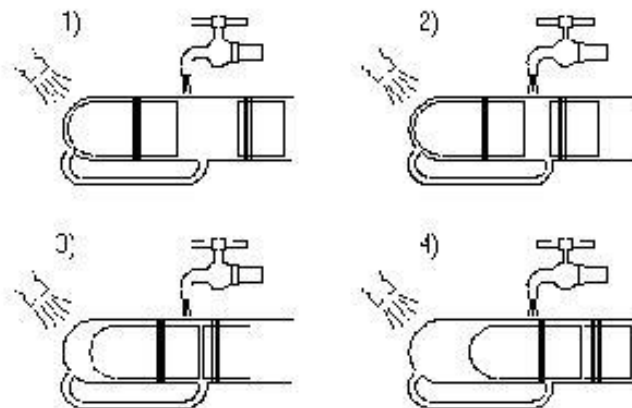


Figura 5 - Princípio de trabalho do Motor Stirling Tipo Beta
Fonte: Barros (2005, p. 29)

Pois:

1 para 2 - O pistão de trabalho movimenta-se para a esquerda ao mesmo tempo em que o gás é resfriado através do circuito de água de resfriamento. Desta maneira, ocorre a compressão do gás de trabalho a temperatura constante;

2 para 3 - O pistão de deslocamento movimenta-se para a direita, fazendo com que o gás desloque-se para a área de volume quente, onde o mesmo é aquecido por uma fonte externa, aumentando sua pressão. No entanto, vale ressaltar que o volume nesse processo é constante;

3 para 4 - Devido a expansão do gás de trabalho, ambos os pistões movimentam para a direita. Durante a expansão, a temperatura se mantém constante;

4 para 1 - O pistão de deslocamento movimenta-se para a esquerda, fazendo com que o gás desloque-se para a área de volume frio, onde o mesmo é resfriado pela água. Apesar de a pressão retornar ao seu valor inicial, é importante notar que o volume se mantém constante.

2.1.4.3. Tipo gama

O princípio de funcionamento do motor Stirling do tipo Gama está baseado na seqüência apresentada na figura (6):

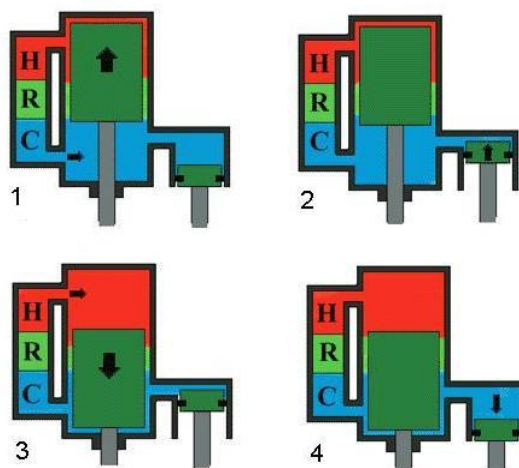


Figura 6 – Princípio de Funcionamento do Motor Tipo Gama
Fonte: Barros (2005, p. 30)

Onde:

1 para 2 - Compressão Isotérmica: O pistão de trabalho movimenta-se para cima, comprimindo o fluido de trabalho, ao mesmo tempo em que rejeita calor para o sistema de resfriamento de forma a manter a temperatura constante;

2 para 3 - Aquecimento a volume constante: Movimentando-se para baixo, o pistão de trabalho faz com que fluido de trabalho se desloque para o espaço de expansão, recebendo calor e, por consequência, elevado a pressão;

3 para 4 - Expansão Isotérmica: A partir do aumento da pressão, o gás de trabalho se expande, movimentando o pistão para baixo, de forma a realizar trabalho. Esta etapa acontece a temperatura constante, ao mesmo tempo em que o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;

4 para 1 - Rejeição de calor a volume constante: O pistão de deslocamento movimenta-se para cima, forçando a passagem do fluido de trabalho espaço de compressão. O calor é rejeitado para o sistema de resfriamento, reduzindo a pressão até a condição inicial.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO PRÁTICO

A partir das bibliografias existentes, foi possível traçar um comparativo entre os tipos de Motor Stirling. Ao analisar as vantagens e desvantagens decorrentes do seu princípio construtivo e funcionamento, optou-se por utilizar o modelo do tipo Gama. Similar ao motor Beta, porém, com a característica de possuir o pistão de trabalho montado em outro cilindro, o motor Gama apresenta o arranjo mais simples de ser fabricado. Esta simplicidade fica evidente ao se comparar o mesmo ao motor do tipo Alfa, que necessita de elementos de vedação em ambos os pistões, o que requer uma maior precisão de usinagem.

A figura (7) apresenta a concepção do motor escolhido para o protótipo..

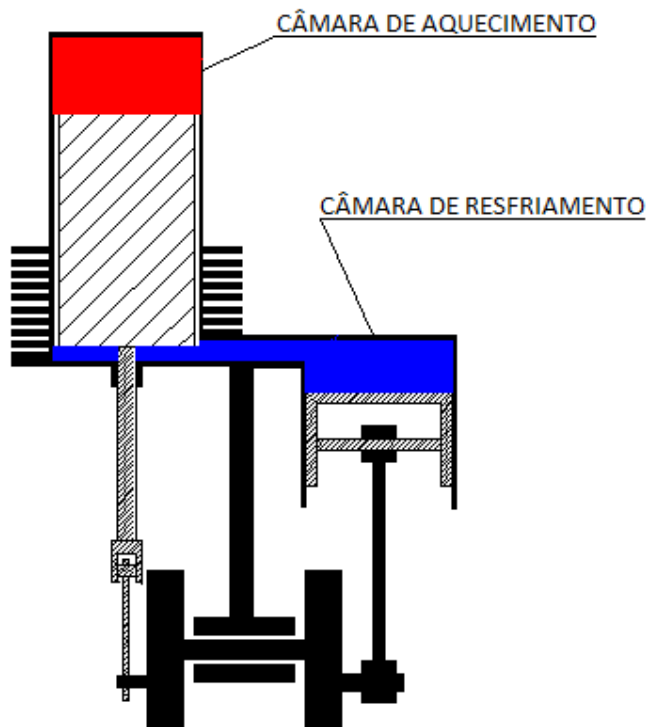


Figura 7 – Esboço do Motor Tipo Gama
Fonte: Autoria Própria

3.2 MODELAMENTO E DETALHAMENTO DO PROTÓTIPO

O Motor Stirling do Tipo Gama é composto basicamente pelos itens descritos abaixo. Para realizar o modelamento das partes, foi utilizado o *software* 3D *SolidWorks 2011*.

Sendo:

- Regenerador - Composto basicamente por aletas de metal, o mesmo atua como um trocador de calor (gás de trabalho), aumentando o rendimento do motor, de forma a deixar seu ciclo mais próximo do teórico.
- Câmara de Expansão – Responsável por realizar a expansão do gás de trabalho, a mesma é composta essencialmente por uma cavidade e um pistão de trabalho, sendo que este é ligado ao disco de transmissão de torque.
- Câmara de Compressão – Tendo por função realizar a compressão do gás de trabalho, a mesma é composta essencialmente por uma cavidade e um pistão de compressão, sendo que este é ligado ao disco de transmissão de torque.
- Eixo de Transmissão – Interliga os pistões presentes nas câmaras citadas anteriormente, bem como transmite o torque ao motor DC.

O detalhamento do motor está diretamente atrelado à definição do volume da câmara de expansão. Tendo em vista a disponibilidade de uma câmara já fabricada, apresentada na figura (8), todo o restante do projeto foi dimensionado considerando as medidas da mesma.

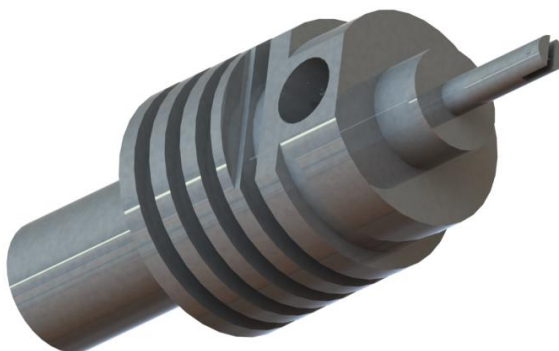


Figura 8 – Câmara de Expansão
Fonte: Autoria Própria

O dimensionamento da câmara de compressão está baseado no curso do pistão de trabalho presente na câmara de expansão. Desta maneira chegou-se ao modelo apresentado na figura (9).

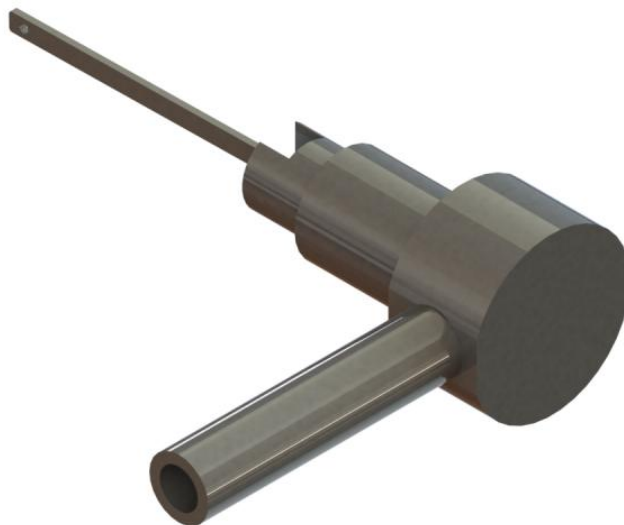


Figura 9 – Câmara de Compressão
Fonte: Autoria Própria

O eixo de transmissão consiste basicamente em uma barra redonda. Com o objetivo de integrar os dois pistões, foram adaptados discos de transmissão ao mesmo, conforme figura (10).

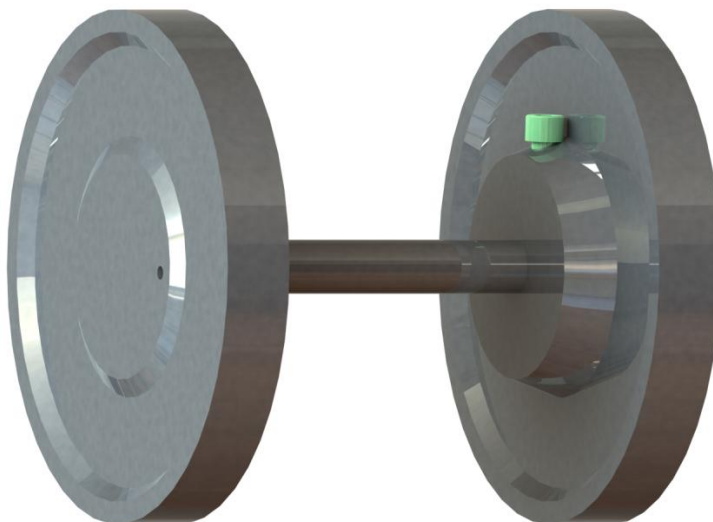


Figura 10 – Eixo de Transmissão
Fonte: Autoria Própria

Todo o sistema será apoiado sobre uma base metálica, apresentado na figura (11), com furos passantes de 6mm de diâmetro para fixação do eixo de transmissão.

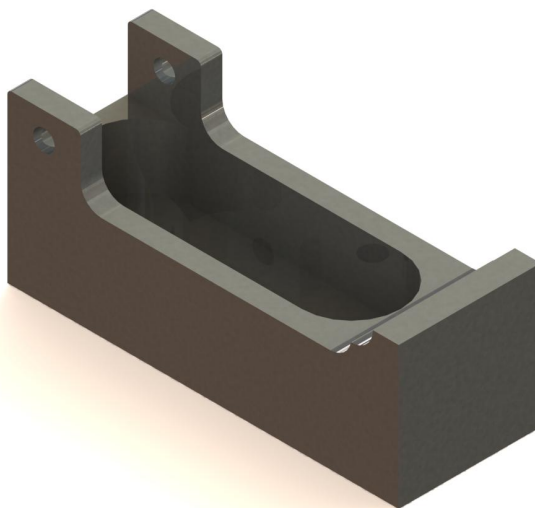


Figura 11 – Base de Apoio
Fonte: Autoria Própria

Como resultado do modelamento descrito acima, é possível realizar a montagem dos componentes, figura (12) e realizar a simulação em ambiente virtual, a fim de certificar a correta montagem e funcionamento do protótipo.

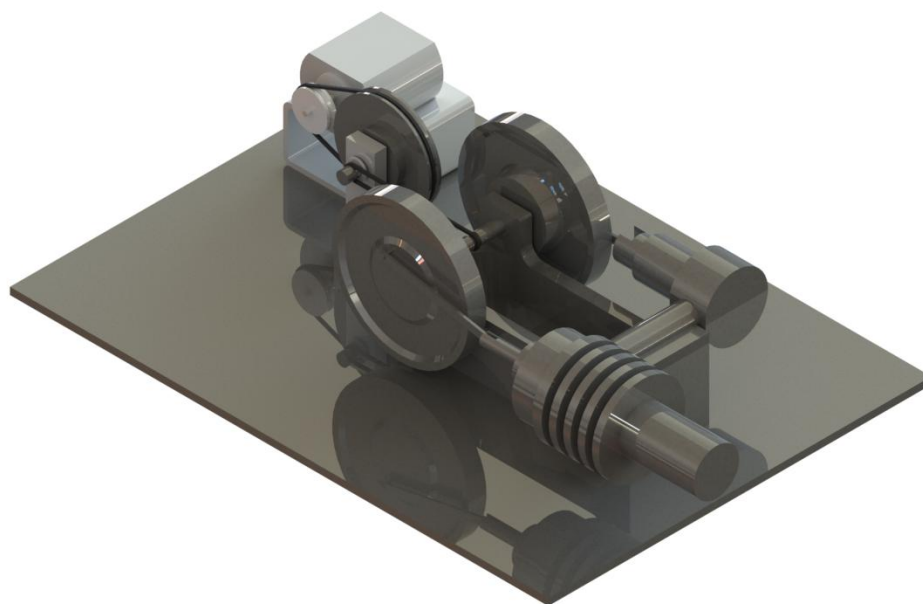


Figura 12 – Protótipo do Motor Stirling
Fonte: Autoria Própria

3.3 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Baseado nos desenhos de detalhamento obtidos a partir do modelamento do protótipo, bem como dos recursos disponíveis, define-se uma sequência para sua fabricação.

Opta-se por iniciar a usinagem da câmara de compressão em aço SAE 1020, uma vez que esta é a peça mais crítica do projeto. Após duas tentativas sem sucesso, decorrente do alto atrito gerado pelo conjunto pistão e câmara, conclui-se que a melhor forma de obtê-la é através de recursos mais qualificados (mão-de-obra especializada e maquinário de alta precisão).

Para a usinagem da base de apoio, utiliza-se um bloco de aço SAE 1020.

Por se tratar de uma peça que sofre grandes esforços decorrentes da rotação do motor, opta-se por fabricar o eixo utilizando aço SAE 1020 como matéria-prima.

A fim de garantir leveza ao modelo, o alumínio é o material escolhido para os discos laterais de transmissão.

Com a confecção de todas as peças, inicia-se a montagem do protótipo a partir da fixação da câmara de expansão na câmara de compressão, e com o auxílio de cola do tipo Loctite 661.

Posteriormente, tanto o conjunto de câmaras quanto o eixo de transmissão podem ser montados na base de apoio do protótipo conforme apresentado na fotografia (3).



Fotografia 3 - Pré-montagem do Motor Stirling
Fonte: Autoria Própria

Com o objetivo de permitir o correto funcionamento do motor de Stirling, os discos laterais são montados ao eixo, considerando uma defasagem de noventa graus (90°) entre os furos de referência.

Por fim, define-se o comprimento das bielas de ligação do eixo de transmissão aos pistões.

4 TESTES E RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios consiste do motor Stirling apresentado no item anterior, devidamente preparado para operar com um maçarico que utiliza gás butano como combustível e temperatura máxima de 1000°C.

Para realizar as medições necessárias utilizam-se os seguintes instrumentos:

- Tacômetro – DT-2234C+
- Balança de Alta Precisão – SHIMADZU UX620H
- Osciloscópio Digital – Hikari HO-2102

4.2 ANÁLISE DO PROTÓTIPO

O objetivo do ensaio é avaliar a capacidade da planta em converter energia térmica em energia elétrica, utilizando motor Stirling. Para tal, divide-se ensaio basicamente em três etapas distintas:

4.2.1 Análise do Projeto Inicial

A análise inicia-se a partir do aquecimento da câmara de trabalho utilizando o maçarico de gás butano à 1000°C durante 120 segundos. Após a aparente estabilização do número de rotações do motor, utiliza-se o tacômetro com o intuito de validar as rotações do mesmo. Nesta medição, alcança-se o valor final de 1000 rpm.

Com o acoplamento do motor DC, observa-se uma queda na rotação do motor de 1000 rpm para 600 rpm devido a resistência imposta pelo mesmo.

Pelo fato do motor Stirling apresentar uma rotação muito baixa se comparada ao motor DC, se faz necessária uma análise do projeto, a fim de encontrar pontos passíveis de melhoria.

Como pontos principais, destacam-se principalmente:

- Alto atrito no eixo – Apesar do ótimo acabamento alcançado durante a usinagem do eixo, o mesmo não é capaz de evitar o alto atrito decorrente do contato com a base de apoio.
- Baixo torque - Por falta de instrumentos específicos, o mesmo não pode ser medido, porém percebe-se que ao aplicar uma resistência mínima o funcionamento do motor é interrompido.

4.2.2 Melhoria de Projeto e Análise

Baseado na análise apresentada anteriormente, vários trabalhos de melhoria no projeto podem ser realizados.

A fim de diminuir ao máximo a perda decorrente do alto atrito entre eixo de transmissão e base de apoio, se faz necessário, o desenvolvimento de uma base em alumínio muito semelhante a anterior, porém com o diferencial de possuir rolamentos, conforme figura (13).

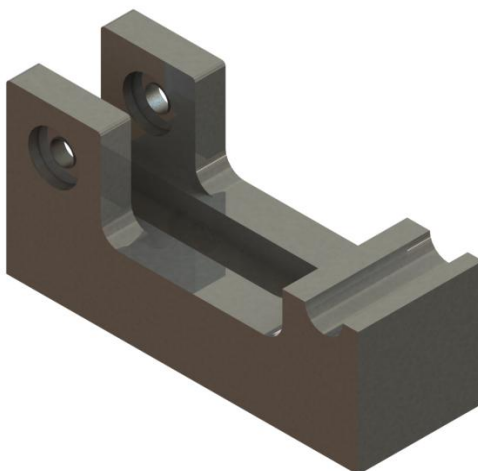


Figura 13 – Base de Apoio revisada

Fonte: Autoria Própria

Desta maneira, espera-se um aumento significativo no número de rotações do motor.

O projeto inicial considera uma relação de transmissão entre o protótipo e o motor elétrico DC de um para um (1/1). No entanto, o resultado encontra-se abaixo do esperado, pois desta forma não é capaz de atingir a rotação mínima necessária para a geração de energia nas saídas do motor DC.

Como solução, opta-se por incluir uma polia no meio do eixo de transmissão com a relação de um para dez (1/10), conforme figura (14).

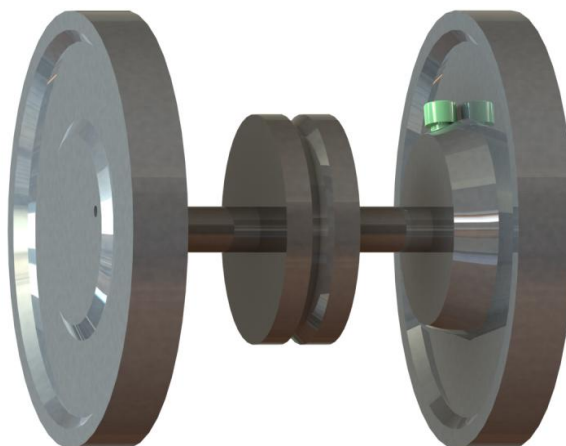


Figura 14 – Eixo de transmissão revisada

Fonte: Autoria Própria

Desta maneira, a cada rotação do motor Stirling o motor DC rotaciona dez vezes mais.

A partir da implementação das melhorias descritas acima o motor é montado novamente, conforme figura (15) e, considerando os mesmos parâmetros do ensaio anterior, o motor pode ser testado novamente.

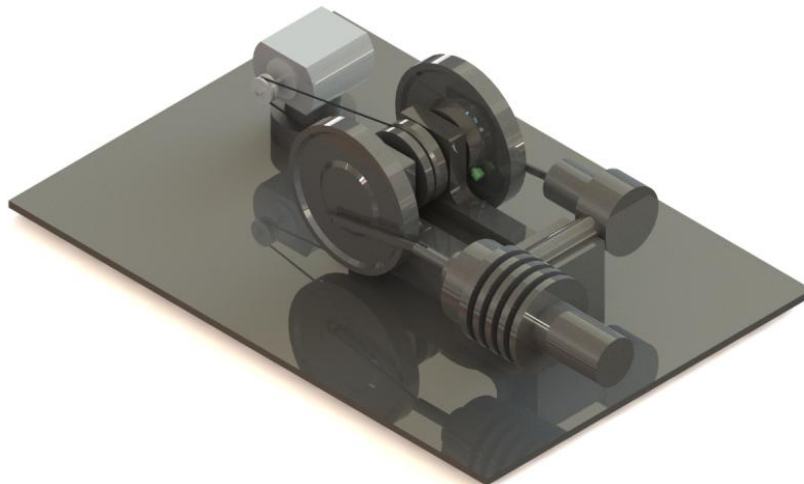
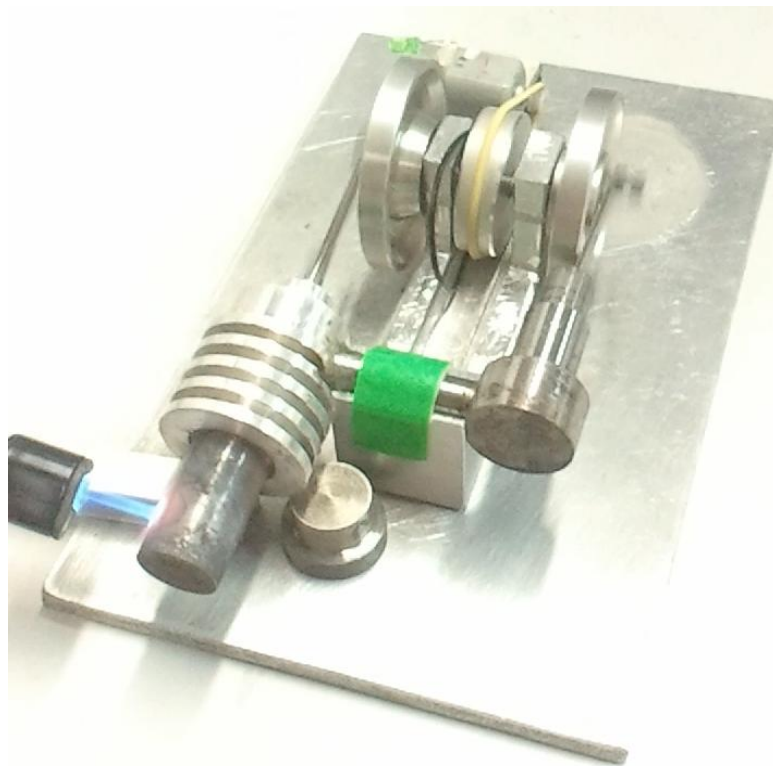


Figura 15 – Protótipo do motor revisado
Fonte: Autoria Própria

Após a estabilização do número de rotações do motor, a medição apresenta o valor final de 1200 rpm. Um ganho de 20% em relação a rotação inicial.

Somado a implementação da polia, o valor transmitido ao motor DC passa de 1200 rpm para 12000 rpm.

Porém, ao acoplar o motor DC, observa-se uma queda na rotação do motor de 1200 rpm para 800 rpm devido a resistência imposta pelo mesmo. Desta maneira, o motor DC passa a trabalhar com 8000 rpm. O teste pode ser visualizado na fotografia (4).



Fotografia 4 – Teste do novo protótipo
Fonte: Autoria Própria

Ao medir a tensão de saída do motor DC em aberto e sua respectiva corrente, obtêm-se os seguintes valores:

- Tensão – 2V
- Corrente – 0,3mA

4.3 EFICIÊNCIA DO PROTÓTIPO

Com os valores finais apresentados, é possível calcular a eficiência do sistema a partir da relação direta entre a potência térmica (ou fluxo de calor) do maçarico de butano e a potência eficaz na saída do motor elétrico.

Vale ressaltar que esta forma de cálculo não leva em consideração as perdas decorrentes dos fenômenos de condução e convecção que ocorrem durante o aquecimento da câmara de expansão do motor Stirling.

4.3.1 Cálculo da Potência Térmica do Maçarico de Butano

Potência Térmica (ou fluxo de calor) é definida como sendo a transmissão de energia térmica de um corpo mais energético para outro menos energético, sendo que esta pode ser realizada por três modos de propagação: condução, convecção e radiação.

De acordo com o CONEM2012 (2012) a potência térmica de dado combustível é determinada a partir da equação (2):

$$Q=(m/\Delta t).PCI, \quad (2)$$

onde: Q – Potência Térmica (W);

m – massa (kg);

Δt – Variação do Tempo (s);

PCI – Poder Calorífico Inferior (kJ/kg).

Vazão mássica é definida como sendo a quantidade em massa de um fluido que escoar através de certa secção em um intervalo de tempo considerado (CASSIOLATO, 2008, p. 2).

Moreira (2011, p. 164) descreve que o poder calorífico inferior é a quantidade de calor que pode produzir 1kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar e os produtos de combustão são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada.

A massa de butano utilizada pode ser obtida através da pesagem do maçarico em dois momentos distintos. Para esta análise em específico, opta-se por realizar a pesagem antes e após 60 segundos de combustão contínua. Como resultado observa-se uma variação de $0,414.10^{-3}$ kg, que pode ser visualizada nas fotografias (5) e (6).



Fotografia 6 – Pesagem Inicial
Fonte: Aatoria própria



Fotografia 5 – Pesagem após 60 segundos
Fonte: Aatoria própria

Considerando o valor do PCI do gás butano igual ao valor apresentado na figura (16) e a vazão mássica de $6,9 \cdot 10^{-6}$ kg/s (massa de butano consumida em 1 segundo), é possível encontrar a potência térmica:

$$Q = 0,3157 \text{ W}$$

GÁS	kJ/Nm ³		kJ/kg	
	PCS	PCI	PCS	PCI
Metano	39900	35890	55600	50000
Etano	69900	64000	51900	47500
Propano	101300	93200	50400	46400
n-Butano	133600	123100	49500	45760
G.N. de Campos	42100	38000	67850	61300
G.N. de Santos	44750	40500	66800	60500
G.N. da Bolívia	41700	37650	69100	62400
GLP (médio)	117200	107900	49900	46000

Figura 16 - Tabela de poder calorífico dos gases
Fonte: Moreira (2011, p. 178)

4.3.2 Medição dos parâmetros para Cálculo da Potência Fornecida através do Motor DC

A fim de calcular a potência eficaz fornecida pelo protótipo, é necessário medir a tensão e a corrente elétrica do sistema. Para tal, é montado um circuito elétrico contendo um resistor de 10 ohms ligado em série com o led, conforme a figura (17).

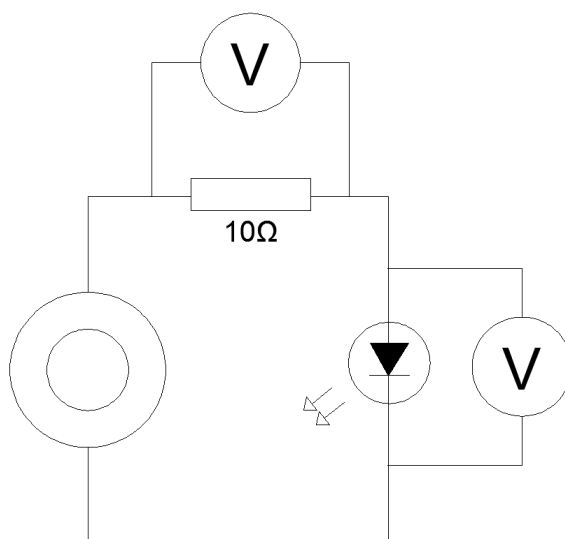


Figura 17 – Esquema elétrico para medição
Fonte: Autoria própria

De acordo com Silva (2008, p. 14) a potência eficaz fornecida neste sistema é dada por:

$$P=(V_r + V_{led}).I, \quad (3)$$

onde: P - Potência elétrica total (W)

V_{led} - Tensão no led (V)

V_r – Tensão no resistor (V)

I - Intensidade de corrente total (A)

Sabendo que a tensão elétrica é dada por (SILVA 2008, p. 14):

$$V = R \times I, \quad (4)$$

onde: V – Tensão (V)

R – Resistencia (ohm)

I – Intensidade de corrente (A)

Com auxílio do osciloscópio digital, é possível encontrar a tensão sobre o resistor, conforme pode ser visualizado na figura (18).

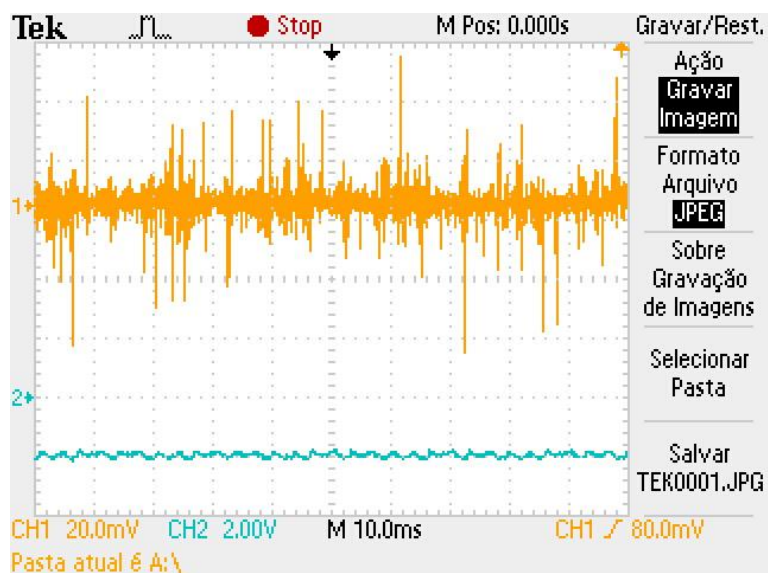


Figura 18 – Medição da tensão no resistor

Fonte: Autoria própria

Sendo 10 ohms o valor do resistor e 20mV a tensão eficaz (V_{rms}) medida sobre o mesmo, utilizando a fórmula (4) obtêm-se a corrente no resistor igual a 2mA.

Sabendo-se que a tensão do led é 2V e a tensão encontrada no resistor é de 20mV, tem-se como tensão total do sistema o valor de 2,02V.

Finalmente, através da aplicação da equação (3) e utilizando os valores citados acima (2,02V para a tensão total e 2mA para a intensidade de corrente), tem-se como resultado a potência elétrica de saída do motor:

$$P_{rms} = 4,04 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

4.3.3 Rendimento do Sistema

O rendimento consiste na parcela de potência consumida por um sistema que é transformada em trabalho, e é dada por:

$$n = P_s / P_e, \quad (6)$$

onde: n - Rendimento

Pe - Potência térmica da fonte quente

Ps - Potência eficaz

A partir da equação (6) e considerando os valores encontrados para a potência térmica do maçarico (Pe) e a potência elétrica eficaz gerada pelo motor DC (Ps), resulta no rendimento:

$$n = 1,28\%$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÃO

Face a todas as atividades desenvolvidas durante o trabalho de conversão de energia térmica em energia elétrica utilizando motor Stirling, dividiu-se esta conclusão em duas vertentes: a fabricação do protótipo e análise dos resultados.

A fabricação da planta levando em consideração uma câmara de combustão previamente definida acabou limitando o tamanho e por consequência a potência eficaz do motor, no entanto foi fator determinante para agilizar o processo de desenvolvimento do protótipo.

Ao analisar os resultados obtidos a partir dos testes realizados no modelo prático, observou-se um rendimento de 1,28%. Em um primeiro momento, este valor pode parecer baixo, no entanto, alguns pontos devem ser destacados.

Devido à impossibilidade de medir a temperatura dentro da câmara de expansão e por consequência calcular a potência térmica dentro da mesma, considerou-se a potência térmica na saída do maçarico de butano (0,3157W). Ao utilizar este valor, todas as perdas decorrentes das trocas térmicas por condução (maçarico e parede da câmara de combustão) e convecção (parede da câmara de combustão e ar) foram ignoradas.

Somado as perdas do motor, seja por atrito, folgas ou outro meio, chega-se ao valor final de $4,04 \cdot 10^{-3}$ W de potência elétrica.

A partir dos resultados apresentados durante o desenvolvimento do projeto, pode-se confirmar que a utilização de motores Stirling para a conversão de energia térmica em energia elétrica é uma realidade, visto as vantagens inerentes a este tipo de motor:

- Capacidade de utilizar várias fontes de calor – Desta maneira, os motores podem ser alimentados através de diversas fontes de energia (combustíveis fósseis, energia solar, etc);

- Baixo desgaste das peças do motor – Devido ao fato das peças móveis não entrarem em contato com o combustível não ocorre a contaminação do lubrificante, resultando menor desgaste das peças decorrente da maior eficiência da lubrificação.

No entanto, o elevado custo de fabricação, bem como o baixo torque em comparação aos motores de combustão interna, são fatores que por hora limitam sua fabricação e aplicação em geral.

Portanto, no que diz respeito à aplicação como fonte de energia elétrica, a tecnologia dos motores Stirling se mostra promissora, podendo se utilizar da energia dissipada em outros processos (caldeiras, queima de resíduos, etc), bem como fontes de energia limpa à exemplo da luz solar.

5.2. PERSPECTIVA DE TRABALHOS FUTUROS

Partindo-se do presente trabalho, existe a possibilidade se aprofundar no assunto a partir dos trabalhos sugeridos a seguir. Devido a falta de tempo hábil os mesmos não puderam ser realizados, mas ficam registrados como sugestões futuras:

- Análise de rendimento do protótipo a partir de diferentes combustíveis;
- Análise de perdas devido as trocas térmicas durante o aquecimento no motor e atritos devido a sua construção;
- Melhoria de rendimento do sistema a partir da melhoria do projeto do motor.

REFERÊNCIAS

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

CASSIOLATO, Cesar; ALVES, Evaristo O. **Controle & Instrumentação**. Sertãozinho: Smar, 2008.

CONEM2012-1428. Análise de um Sistema de Refrigeração por Absorção, que tem como Fonte Térmica Gases de Exaustão, de uma Planta de Cogeração Aplicada em Embarcações Pesqueiras. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7, 2012, São Luís. **Anais eletrônicos...** São Luís: CONEM, 2012. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/PDF/CONEM2012-1428.PDF>>. Acesso em: 12 nov. 2012.

CONSERVAÇÃO INTERNACIONAL BRASIL. Disponível em: <<http://www.conservation.org.br/noticias/noticia.php?id=440>>. Acesso em: 27 mai. 2012.

DEUTSCHES MUSEUM. Disponível em: <<http://www.deutsches-museum.de/en/exhibitions/energy/power-engines/caloric-engines/>>. Acesso em: 30 jun. 2012.

FINEP. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/fundos_setoriais/ct_energ/documentos/ct-energ03estado_arte.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2012.

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

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

MOREIRA, José R. S; **Tópicos Seleccionados de Aplicações da Termodinâmica**. São Paulo: SISEA, 2011.

ROSSETIN, André L et al. **Análise da Aplicabilidade dos Motores Stirling**. Curitiba, 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, 2007.

ROXO, Lourenço B. **Geração de Energia Elétrica com Coletor Solar e Motor Stirling**. São Paulo, 143 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, 2007.

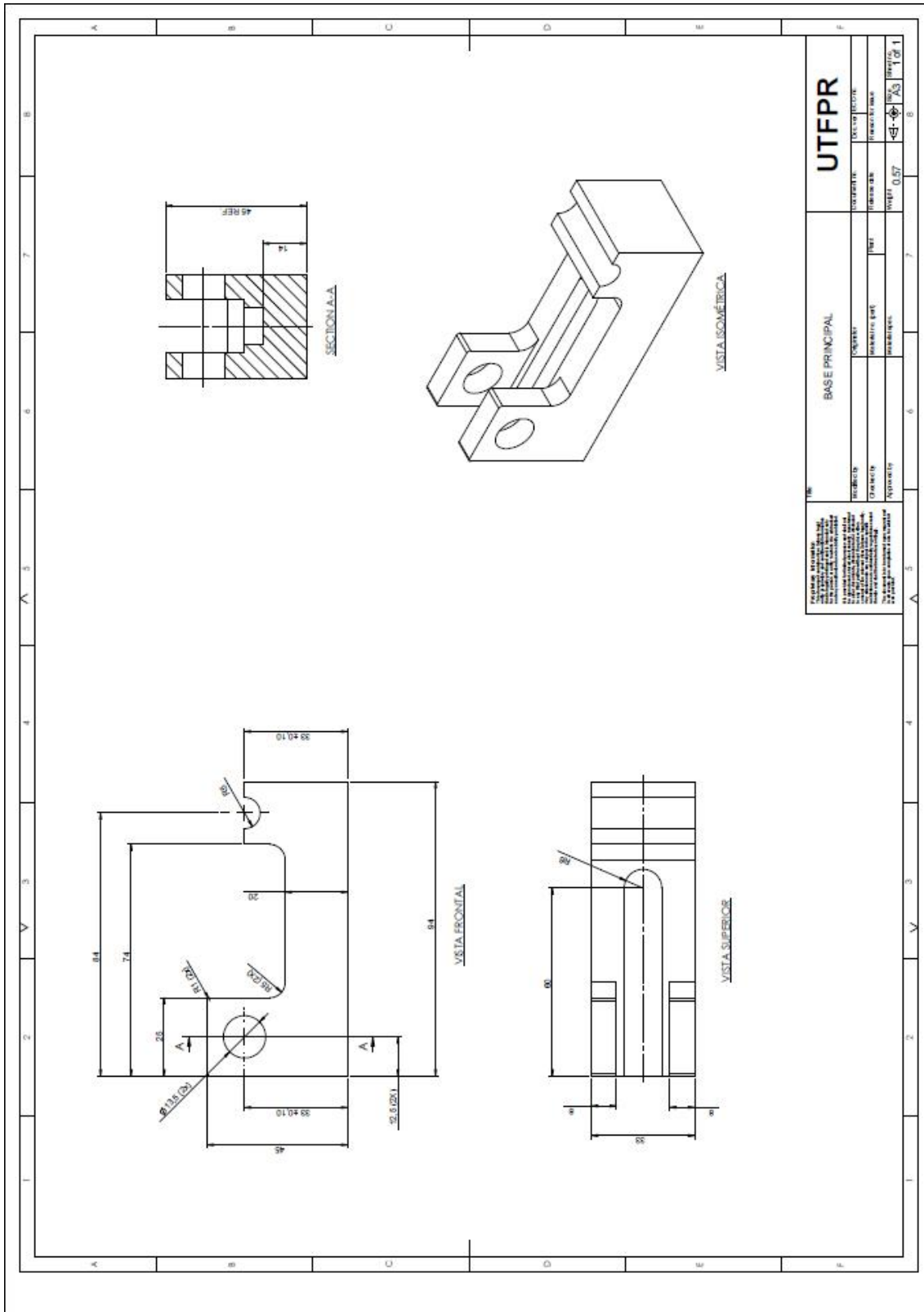
SILVA, Henrique R. **O Aquecimento dos Condutores na Situação de Curto-Circuito**. Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2008.

SILVA, J. C., HOFFMANN, Ronaldo . **O uso do ciclo termodinâmico Stirling no aproveitamento de fontes térmicas**. In: XVII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Passo Fundo, 2002.

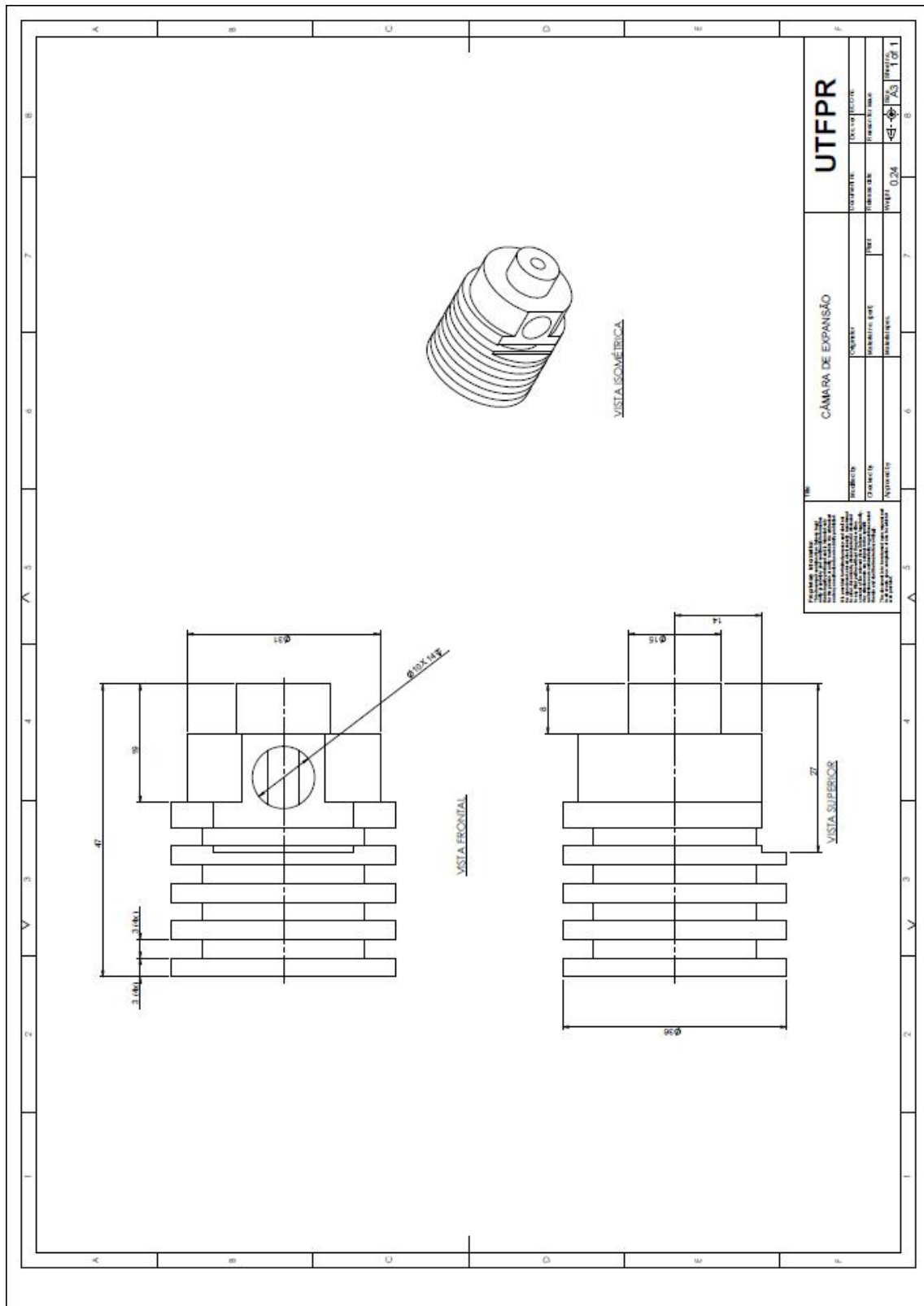
SILVA, R. P., **Relatório Técnico – Projeto Motor de Stirling**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

STIRLING ENGINES. Disponível em:
<<http://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/erictwo.htm>>. Acesso em: 21 mar. 2012.

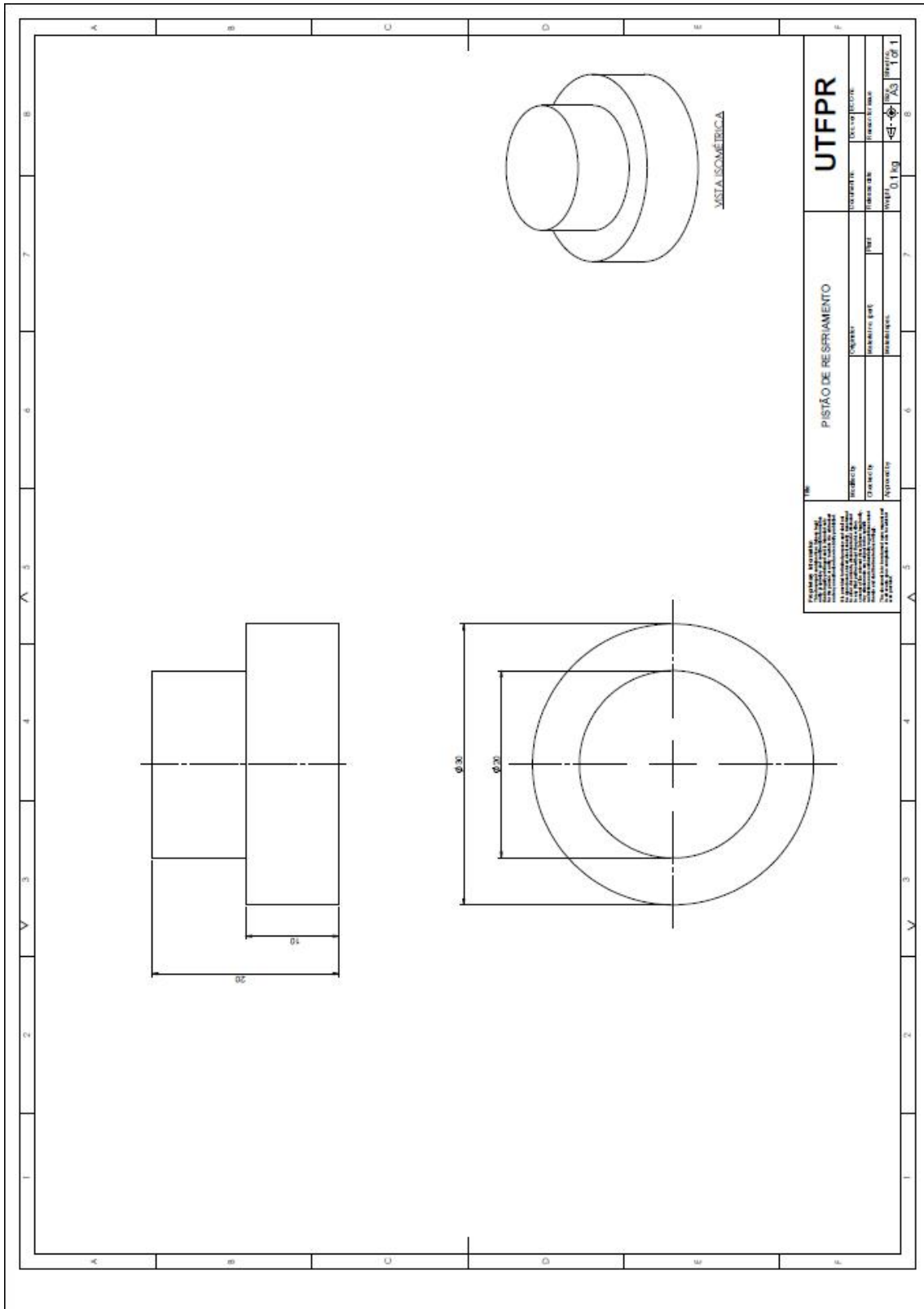
APÊNDICES B – BASE PRINCIPAL



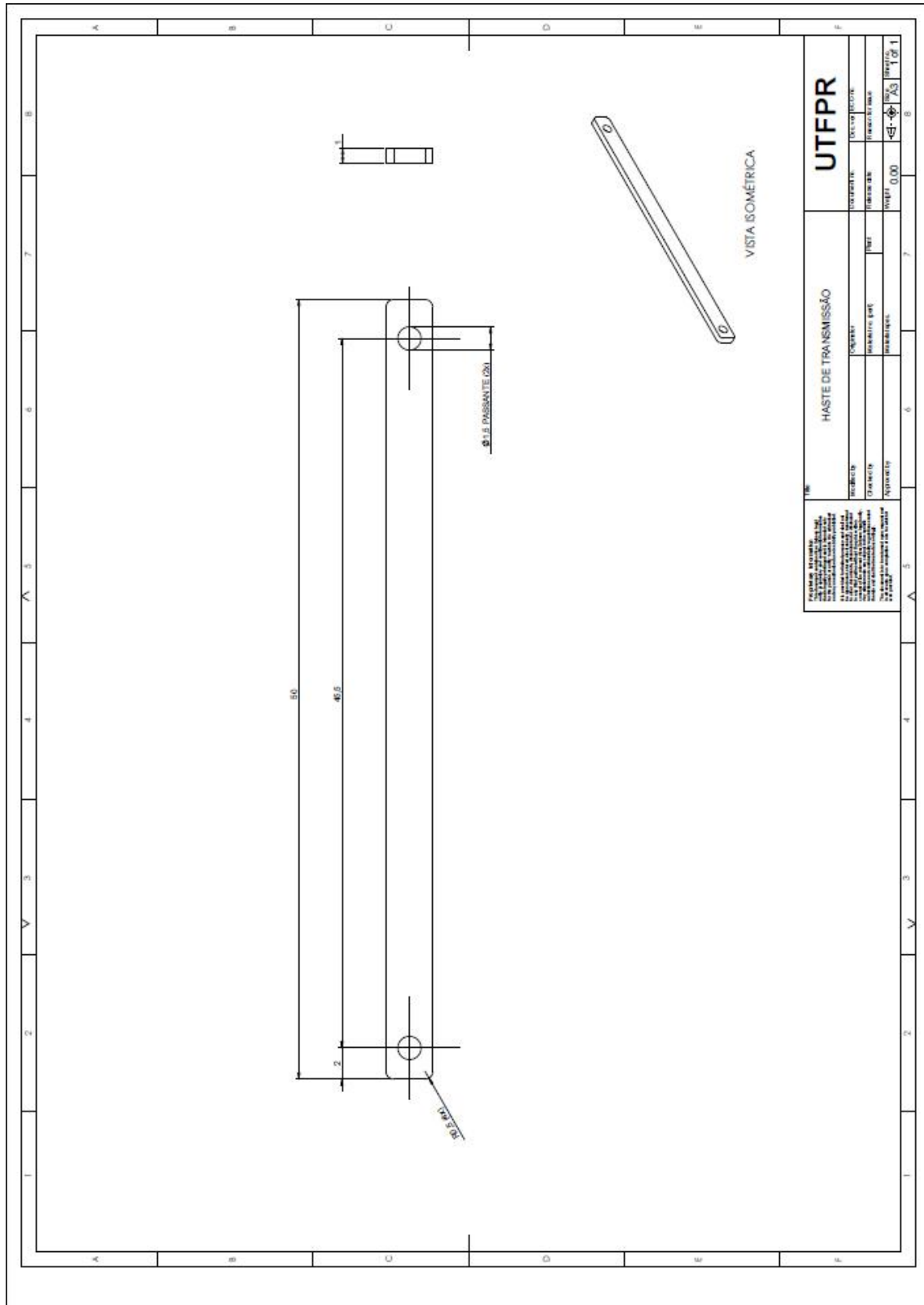
APÊNDICES C – CÂMARA DE EXPANSÃO



APÊNDICES G – PISTÃO DE RESFRIAMENTO



APÊNDICES H – HASTE DE TRANSMISSÃO



<p>UTFR</p>	
<p>HASTE DE TRANSMISSÃO</p>	
<p>PROJETO</p>	<p>REVISÃO</p>
<p>DATA</p>	<p>ASSINATURA</p>
<p>PROJETO</p>	<p>REVISÃO</p>
<p>DATA</p>	<p>ASSINATURA</p>
<p>PROJETO</p>	<p>REVISÃO</p>
<p>DATA</p>	<p>ASSINATURA</p>
<p>PROJETO</p>	<p>REVISÃO</p>
<p>DATA</p>	<p>ASSINATURA</p>
<p>PROJETO</p>	<p>REVISÃO</p>
<p>DATA</p>	<p>ASSINATURA</p>

APÊNDICES I – DISCO DE TRANSMISSÃO

