



UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

**FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Trabalho de Licenciatura

Construção e Teste de um Motor Stirling Laboratorial

Autor: Nilton Gabriel Madade

Supervisor: Prof. Doutor Eng^o. Geraldo Nhumaió

Maputo, Agosto de 2022



**FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Trabalho de Licenciatura

Construção e Teste de um Motor Stirling Laboratorial

Autor: Nilton Gabriel Madade

Supervisor: Prof. Doutor Eng^o. Geraldo Nhumaió

Maputo, Agosto de 2022



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante: Nilton Gabriel Madade

Entregou no dia ___/___/20___, as ___ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____

Intitulado: **CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM MOTOR STIRLING LABORATORIAL**

Maputo, _____ de _____ de 20___

A Chefe de Secretaria

DEDICATÓRIAS

Dedico o presente trabalho aos meus pais, Gabriel Salomão Madade e Mónica Alberto Ngonhamo, pelo amor e todo o esforço investido durante toda a minha formação e vida.

AGREDECIMENTOS

Primeiro e principalmente, agradeço a Deus, pelo amor e por me guardar e proteger a minha vida.

Aos meus pais Gabriel e Mónica pelo apoio e contínuo incentivo, agradeço aos meus irmãos Alcídio, Valter e Sofia pelo apoio e suporte.

Ao meu supervisor Prof. Doutor Eng^o. Geraldo Nhumaio, pelo apoio, disponibilidade e paciência, sugestões e atribuição do tema.

Aos meus amigos, colegas e professores que directa ou indirectamente contribuíram no meu percurso académico.

RESUMO

Com a elevada demanda de energia e o alto índice de poluição atmosférica, vê-se a necessidade de se buscar fontes alternativas e renováveis para gerar energia eficientemente sem degradar o ambiente e prejudicar a vida no planeta. Este trabalho tem como objectivo a construção de um motor Stirling laboratorial e realização de testes para verificar o seu funcionamento. A metodologia adoptada baseia-se na pesquisa bibliográfica sobre motores Stirling e também no desenvolvimento experimental de um protótipo. O motor Stirling é uma máquina de combustão externa que transforma energia térmica em mecânica a partir de praticamente qualquer fonte de calor. Existem três principais tipos de motor Stirling: alfa, beta e gama. Optou-se por construir um protótipo tipo gama devido a acessibilidade de materiais para sua construção, bem como a facilidade e simplicidade de sua fabricação. Os testes do funcionamento do protótipo foram realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, como fonte de calor foi utilizado um briquete de madeira (serradura) e analisou-se a influência do meio refrigerante para o seu funcionamento. Os ensaios mostraram que a rotação do motor é maior quanto maior for a diferença de temperatura entre as câmaras quente e fria do motor. No entanto, a temperaturas mais altas da câmara quente verificou-se uma queda da rotação devido à pouca eficiência dos sistemas de refrigeração utilizados.

Palavras-chave: fonte alternativa; motor Stirling; combustão externa.

ABSTRACT

With the high demand for energy and the high rate of atmospheric pollution, there is a need to seek alternative and renewable sources to generate energy efficiently without degrading the environment and harming life on the planet. This work aims to build a laboratory Stirling engine and carry out tests to verify its operation. The methodology adopted is based on bibliographic research on Stirling engines and also on the experimental development of a prototype. The Stirling engine is an external combustion engine that transforms thermal energy into mechanical energy from practically any heat source. There are three main types of Stirling engine: alpha, beta and gamma. Was chosen to build a gamma-type prototype due to the accessibility of materials for its construction, as well as the ease and simplicity of its manufacture. The operation tests of the prototype were carried out at the Faculty of Engineering of the Eduardo Mondlane University, as a heat source a wood briquette (sawdust) was used and the influence of the refrigerant medium for its operation was analyzed. The tests showed that the engine speed is higher the greater the temperature difference between the engine's hot and cold chambers. However, at higher temperatures in the hot chamber, there was a drop in rotation due to the low efficiency of the cooling systems used.

Keywords: alternative source; Stirling engine; external combustion.

ÍNDICE

Lista de símbolos.....	v
Lista de figuras	vii
CAPÍTULO I.....	1
1. Introdução	1
1.1. Âmbito	1
1.2. Objectivos.....	1
1.2.1. Objectivo Geral	1
1.2.2. Objectivos Específicos.....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Organização do relatório	2
CAPÍTULO II.....	4
2. Investigação Bibliográfica.....	4
2.1. Invenção e desenvolvimento inicial do motor Stirling	4
2.2. Finais do século XIX.....	5
2.3. Avivamento no século XX.....	5
CAPÍTULO III.....	7
3. Fundamentos teóricos.....	7
3.1. Motor Stirling e seu ciclo termodinâmico	7
3.1.1. Componentes básicos do motor Stirling	7
3.1.2. Ciclo termodinâmico do motor Stirling	10
3.2. Fluido de trabalho.....	13
3.3. Vantagens e desvantagens do motor Stirling	14
3.3.1. Vantagens.....	14
3.3.2. Desvantagens.....	14
3.4. Aplicação do motor Stirling.....	14
3.4.1. Geração de energia eléctrica.....	14

3.4.2.	Accionamento mecânico e propulsão	15
3.4.3.	Aquecimento e resfriamento	16
3.5.	Tipos de motor Stirling.....	16
3.5.1.	Motor Stirling tipo Alfa.....	17
3.5.2.	Motor Stirling tipo Beta.....	18
3.5.3.	Motor Stirling tipo Gama	19
3.6.	Teoria de Schmidt para o motor Stirling	20
3.6.1.	Teoria de Schmidt no motor Stirling tipo Gama	23
CAPÍTULO IV		28
4.	Trabalho realizado.....	28
4.1.	Descrição geral do protótipo.....	28
4.2.	Câmara quente e pistão de deslocamento	29
4.3.	Câmara fria e pistão de trabalho	31
4.4.	Virabrequim e volante.....	32
4.5.	Testes realizados	34
4.5.1.	Teste utilizando ar como meio refrigerante	35
4.5.2.	Testes utilizando água como meio refrigerante	36
CAPÍTULO V		38
5.	Discussão dos resultados.....	38
5.1.1.	Análise do aquecimento da câmara quente	38
5.1.2.	Análise da rotação do motor	38
CAPÍTULO VI		40
6.	Avaliação económica e ambiental	40
6.1.	Custos do projecto.....	40
6.2.	Impacto ambiental	41
CAPÍTULO VII		42
7.	Conclusões e recomendações	42
7.1.	Conclusões.....	42

7.2. Recomendações.....	42
Referências bibliográficas.....	43
Outra bibliografia consultada	44
Anexo 1: Materiais auxiliares para a construção do motor	1
Anexo 2: Termo de Atribuição de Tema do TL	2

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia Romana

a	Coeficiente a	–
B	Coeficiente B	–
c	Coeficiente c	–
c_v	Calor específico a volume constante	–
dU	Variação da energia interna	kJ
E_C	Energia de compressão	J
E_E	Energia de expansão	J
E_i	Energia do motor	J
L_C	Potência de compressão	W
L_E	Potência de expansão	W
L_i	Potência do motor	W
m	Massa	kg
n	Quantidade de substância do gás	–
n	Velocidade de rotação do motor	Hz
P	Pressão	Pa
Q	Calor total transferido	kJ
R	Constante do gás ideal	$kJ/kg \cdot K$
s	Coeficiente s	–
t	Temperatura relativa	–
T	Temperatura	K
T_C	Temperatura do gás no cilindro de compressão	K

T_E	Temperatura do gás no cilindro de expansão	K
T_H	Temperatura do corpo de alta temperatura	$^{\circ}C$
T_L	Temperatura do corpo de baixa temperatura	$^{\circ}C$
T_R	Temperatura do gás no regenerador	K
v	volume percorrido relativo	—
V	Volume total	m^3
V_C	Volume momentâneo do cilindro de compressão	m^3
V_{DC}	Volume morto do cilindro de compressão	m^3
V_{DE}	Volume morto do cilindro de expansão	m^3
V_E	Volume momentâneo do cilindro de expansão	m^3
V_R	Volume do regenerador	m^3
V_{SC}	Volume percorrido pelo pistão de compressão	m^3
V_{SE}	Volume percorrido pelo pistão de expansão	m^3
W	Trabalho total realizado	kJ
X	Volume morto relativo	—

Simbologia Grega

η	Eficiência do motor	—
$\eta_{t,Carnot}$	Eficiência térmica do ciclo de Carnot	—
$\eta_{t,Stirling}$	Eficiência térmica do ciclo de Stirling	—
θ	Ângulo de rotação da biela	$^{\circ}$
φ	Ângulo de fase	$^{\circ}$

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Robert Stirling (1790 - 1878)	4
Figura 2: Gerador Stirling da Philips MP1002CA.....	6
Figura 3: Motor original de Robert Stirling	7
Figura 4: Componentes-chave (Motor tipo Beta).....	8
Figura 5: Diagramas P-V e T-s do ciclo Stirling.....	10
Figura 6: Processo 1-2: Expansão isotérmica do fluido de trabalho.....	11
Figura 7: Processo 2-3: Rejeição de calor a volume constante.....	12
Figura 8: Processo 3-4: Compressão isotérmica do gás.	12
Figura 9: Processo 4-1: Aquecimento a volume constante.	13
Figura 10: Concentrador de disco parabólico.	15
Figura 11: Funcionamento do motor tipo Alfa.....	18
Figura 12: Funcionamento do motor tipo Beta.....	19
Figura 13: Funcionamento do motor tipo Gama	20
Figura 14: Esquema de um motor Stirling tipo Gama.....	23
Figura 15: Desenho esquemático do motor.....	28
Figura 16: Vista explodida do protótipo construído.....	29
Figura 17: Câmara quente.....	30
Figura 18: Vista geral e explodida do pistão de deslocamento.....	30
Figura 19: Câmara de trabalho.....	31
Figura 20: Vista geral e explodida do pistão de trabalho.....	31
Figura 21: Virabrequim	32
Figura 22: Vista geral e explodida do volante.....	32
Figura 23: Montagem do virabrequim e volante no suporte.	33
Figura 24: Protótipo construído.	34

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. ÂMBITO

Actualmente, a vida no planeta terra vem sofrendo com mudanças climáticas, superaquecimento global, e outras catástrofes, causadas pela crescente exploração e utilização de combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral, gás natural, e de energias não renováveis que poluem o ambiente. Tal facto, faz com que se busquem meios e formas de energia renováveis e alternativas e que não afectem negativamente a vida no planeta. Neste contexto, o motor Stirling, apresenta-se como uma das excelentes soluções para a diminuição da poluição do planeta.

Na época de sua invenção o motor Stirling teve a utilização limitada sobretudo pela tecnologia dos materiais de que se dispunha na altura, o que levou ao seu esquecimento nos finais do século XIX. Entretanto, hoje o avanço da tecnologia dos materiais, o desenvolvimento deste motor é mais simples, permitindo a sua utilização na geração de energia em zonas remotas (VIDAL, et al., 2014).

Os motores Stirling apresentam uma eficiência muito alta se comparados com motores de combustão interna, possuindo cerca de 45% de eficiência energética, contra os 20% a 30% dos motores de combustão interna. Além disso, podem usar praticamente qualquer fonte de calor para o seu funcionamento, bastando que haja uma diferença significativa entre as temperaturas das partes quentes e frias do motor (HELERBROCK, s.d.).

1.2. OBJECTIVOS

1.2.1. Objectivo Geral

O objectivo geral deste trabalho é desenvolver experimentalmente um protótipo de um motor Stirling laboratorial, pelo que será utilizado material fácil de encontrar e barato.

1.2.2. Objectivos Específicos

Os objectivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Descrever o princípio de funcionamento de um motor Stirling;
- ✓ Apresentar os tipos de motores Stirling e suas características;
- ✓ Construir um protótipo de um motor Stirling; e
- ✓ Realizar testes e discutir os resultados.

1.3. METODOLOGIA

A metodologia usada para a realização do presente trabalho é a pesquisa exploratória, tendo se recorrido à pesquisa bibliográfica sobre os motores Stirling. De seguida fez-se o desenvolvimento de um protótipo de onde se fez uma análise do seu funcionamento através de gráficos.

Os autores que mais contribuíram para este trabalho foram (PAUTZ, 2013), (PEREIRA, 1999), (PLANAS, 2018) e (TORAL, 2015)

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O capítulo II apresenta uma investigação bibliográfica, onde é mostrado o desenvolvimento do motor Stirling ao longo do tempo desde à sua invenção até aos dias actuais.

O capítulo III apresenta os fundamentos teóricos, fazendo a descrição do funcionamento do motor Stirling, seu ciclo termodinâmico e a classificação dos motores segundo a disposição dos pistões, e ainda o teorema de Schmidt para os motores Stirling. São apresentados os diagramas e gráficos que relacionam os principais parâmetros do motor.

O capítulo IV apresenta o trabalho realizado, com foco na construção do protótipo escolhido e, na realização de alguns testes.

No capítulo V é apresentada a discussão e análise dos resultados obtidos durante os testes.

O capítulo VI apresenta um estudo de viabilidade económica na construção do motor Stirling laboratorial. É apresentado também um estudo do impacto que o motor tem sobre o ambiente.

O capítulo VII apresenta as principais conclusões após a realização do trabalho, bem como sugestões ou recomendações para projectos futuros.

CAPÍTULO II

2. INVESTIGAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INVENÇÃO E DESENVOLVIMENTO INICIAL DO MOTOR STIRLING

O motor Stirling ou motor de ar Stirling como era conhecido na altura, foi inventado e patenteado em 1816 pelo ministro escocês Robert Stirling. Nessa altura, os motores a vapor usados eram muito perigosos e as explosões de suas caldeiras causavam sérios ferimentos e fatalidades, então, o motor Stirling seria uma alternativa mais segura.

A primeira aplicação prática do motor Stirling foi em 1818, quando foi usado para o bombeamento de água em uma pedreira.

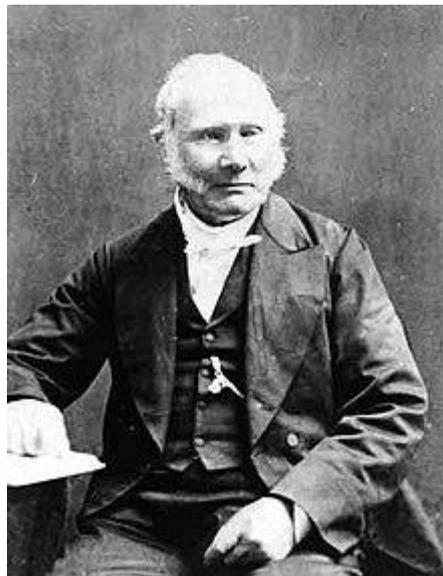


Figura 1: Robert Stirling (1790 - 1878)

Fonte: HIRATA apud PAUTZ (2013)

Um desenvolvimento subsequente de Robert Stirling e seu irmão James, um engenheiro, melhorou a configuração original do motor Stirling incluindo a pressurização, que em 1843, tinha aumentado a sua potência suficientemente para accionar todas as máquinas numa fundição de ferro em Dundee. Contudo, a necessidade de funcionamento em altas temperaturas para maximizar a potência e a eficiência, expôs a limitação dos materiais da época. Devido a esse facto, o motor de Dundee foi substituído por um motor a vapor após três falhas.

2.2. FINAIS DO SÉCULO XIX

Depois da substituição do motor Stirling em Dundee, os motores Stirling nunca mais competiram com as máquinas a vapor como fonte de energia em escala industrial. No entanto, por volta de 1860, foram produzidos menores motores Stirling em grande quantidade, para aplicação onde baixa e média potência eram necessárias, como para bombeamento de ar para órgãos de igrejas ou aumento de água. Nesse período, não houve melhorias significativas do motor Stirling.

2.3. AVIVAMENTO NO SÉCULO XX

Na primeira parte do século XX, a utilização “doméstica” do motor Stirling foi gradualmente assumida por motores elétricos e pequenos motores de combustão interna, e nos finais da década de 1930, estavam praticamente esquecidos, sendo somente produzidos para brinquedos e alguns pequenos ventiladores.

Em 1937, a Philips usou novos materiais e tecnologia, alcançando desse modo um novo patamar dos motores Stirling. O conhecimento sobre a transferência de calor e mecânica dos fluidos, foi de grande importância para a melhoria da estrutura e elevou a estabilidade do motor Stirling.

Em 1951, foi produzido um gerador de 180/200 W designado MP1002CA (conhecido como série *Bungalow*). O lote inicial era de 250, mas, devido ao seu alto preço, apenas cerca de 150 artigos foram produzidos, dos quais alguns foram vendidos para universidades e faculdades de engenharia ao redor do mundo.



Figura 2: Gerador Stirling da Philips MP1002CA

Fonte: (TORAL, 2015)

Paralelamente à serie *Bungalow*, até o final de 1970 a Philips desenvolveu vários motores Stirling experimentais, mas só alcançou sucesso com o motor Stirling revertido, crio-refrigerador¹. A Philips registou um grande número de patentes e acumulou riqueza de informação, que licenciou para outras empresas, formando assim a base para o desenvolvimento do motor na era moderna.

Em 1996, a marinha sueca começou a usar submarinos de classes *Gotland* e *Södermanland* accionados por motores Stirling quando submersos. É usado um motor Stirling para accionar o gerador que recarrega as baterias e fornece energia eléctrica para a propulsão, um suprimento de oxigénio líquido é transportado para apoiar a queima do combustível diesel para alimentar o motor. Também são usados motores Stirling nos submarinos japoneses de classe *Sōryū*.

No início do século XXI, foram utilizados motores Stirling para a produção de energia eléctrica tendo como fonte de calor a energia solar.

¹ É um refrigerador projectado para operar em temperaturas criogénicas abaixo de 123 K (-150°C).

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. MOTOR STIRLING E SEU CICLO TERMODINÂMICO

O motor Stirling é um motor térmico operado pela compressão e expansão cíclica de ar ou outro gás a diferentes temperaturas, resultando na conversão líquida de energia térmica em trabalho mecânico. Mais especificamente, o motor Stirling é um motor térmico regenerativo de ciclo fechado com um fluido de trabalho gasoso permanente (WALKER apud TORAL, 2015).

O regenerador é a componente chave inventado por Robert Stirling, e a sua presença é que distingue um verdadeiro motor Stirling de qualquer outro motor de ar quente de ciclo fechado.

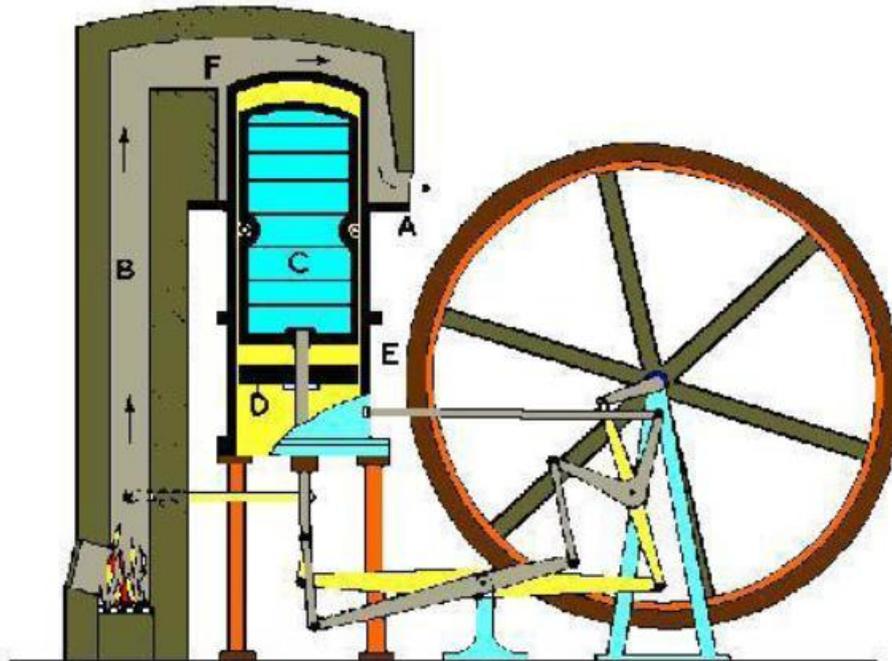


Figura 3: Motor original de Robert Stirling

Fonte: (CRUZ, 2012)

3.1.1. Componentes básicos do motor Stirling

Como consequência da operação de ciclo fechado, no motor Stirling, o calor é transmitido da fonte para o fluido de trabalho por meio de trocadores de calor e finalmente para um dissipador de calor.

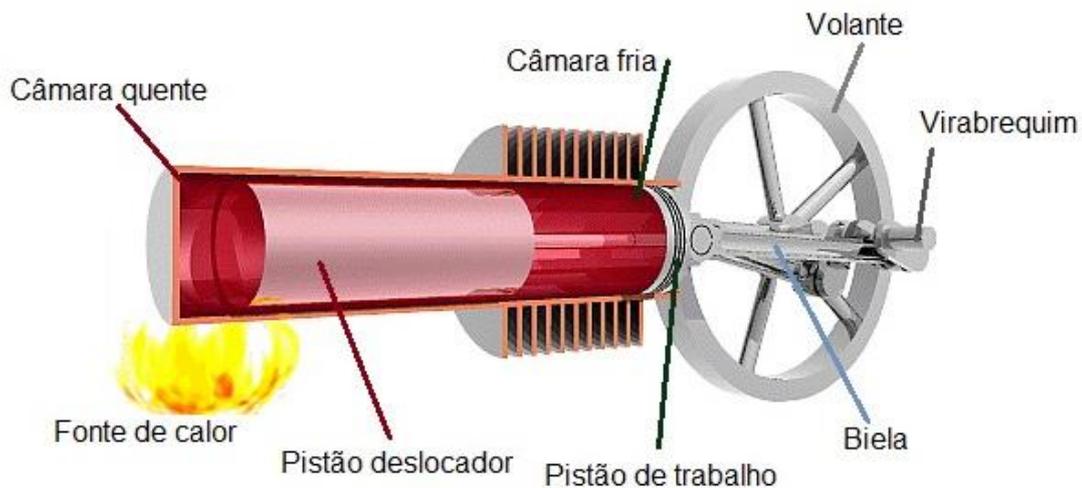


Figura 4: Componentes-chave (Motor tipo Beta).

Fonte: (CPI - ENG: engineering, 2016) adaptado

a) Fonte de calor

O motor Stirling pode utilizar praticamente qualquer fonte de calor para o seu funcionamento desde a chama de uma vela e até mesmo o calor transferido pela palma de uma mão. Basta que haja uma diferença significativa entre as temperaturas das partes quente e fria do motor (HELERBROCK, s.d.).

Assim, as fontes de calor podem ser a combustão de um combustível, energia solar concentrada, energia geotérmica, energia nuclear, calor residual e biomassa.

b) Câmara quente/ Aquecedor

Em pequenos motores e de baixa potência, a câmara quente consistir simplesmente de paredes, mas quando maiores potências são necessárias, são usadas alhetas internas ou externas ou vários tubos finos para aumentar a área de troca de calor.

Os motores que operam em altas potências e pressões requerem que as câmaras quentes sejam feitas de ligas que têm alta resistência em altas temperaturas e resistência à corrosão.

c) Regenerador

O regenerador é um trocador de calor onde o calor do fluido quente é armazenado de forma intermitente em um meio de armazenamento térmico antes de ser transferido para o fluido frio (CONNOR, 2019).

Nos motores Stirling, a regeneração tem como efeito principal aumentar a eficiência térmica pela reciclagem do calor interno, que de outra forma, passaria pelo motor irreversivelmente.

d) Câmara fria/ Refrigerador

Em motores pequenos e de baixa potência, a câmara fria pode consistir simplesmente de paredes do espaço frio, mas quando são necessárias maiores potências, são usados refrigeradores como um líquido como a água, para que transfira calor suficiente.

e) Dissipador de calor

Quanto maior for a diferença de temperaturas entre as câmaras fria e quente, maior será a eficiência do motor Stirling. Em motores pequenos e baixa potência, o ambiente em que estes funcionam funciona como dissipador de calor. No caso de motores de média e alta potência, é colocado um radiador para transferir o calor do motor para o ambiente.

Por exemplo, os motores marítimos usam a água (seu ambiente de funcionamento) para dissipar o calor do motor.

f) Deslocador

O deslocador é um pistão de propósito especial, usado nos motores Stirling do tipo Beta e Gama, para mover o fluido de trabalho para frente e para trás entre as câmaras quente e fria. Dependendo do tipo de configuração do motor, o deslocador pode ou não estar vedado dentro do cilindro, ou seja, pode estar ligado ao cilindro de forma frouxa, permitindo que o fluido de trabalho passe dele para ocupar a outra parte do cilindro.

g) Virabrequim

O virabrequim ou eixo de manivelas é o eixo central do motor que recebe a força gerada pelo movimento dos pistões e a converte em torque, e conseqüentemente, ocorre a rotação do eixo.

h) Biela

A biela é um elemento responsável por transformar o movimento linear do pistão e do deslocador em movimento de rotação ao virabrequim.

Quando a interligação ao virabrequim entre o pistão de trabalho e o deslocador tem uma defasagem de 90° , a potência de saída não apresenta o seu valor máximo (LLOYD apud DIAS, 2016).

i) Volante

O volante é um componente mecânico que armazena energia cinética de rotação e amortece os impulsos provocados pelos pistões sobre o virabrequim.

Durante o processo de expansão, o volante acumula energia que é depois liberada para execução dos intervalos em que não se produz energia no motor.

3.1.2. Ciclo termodinâmico do motor Stirling

O ciclo ideal de Stirling é um ciclo termodinâmico reversível e cíclico, que consiste em quatro processos termodinâmicos actuando sobre o fluido de trabalho:

- 1 – 2: Expansão isotérmica
- 2 – 3: Rejeição de calor a volume constante
- 3 – 4: Compressão isotérmica
- 4 – 1: Adição de calor a volume constante

No entanto, no processo real, a expansão e compressão não são perfeitamente isotérmicas.

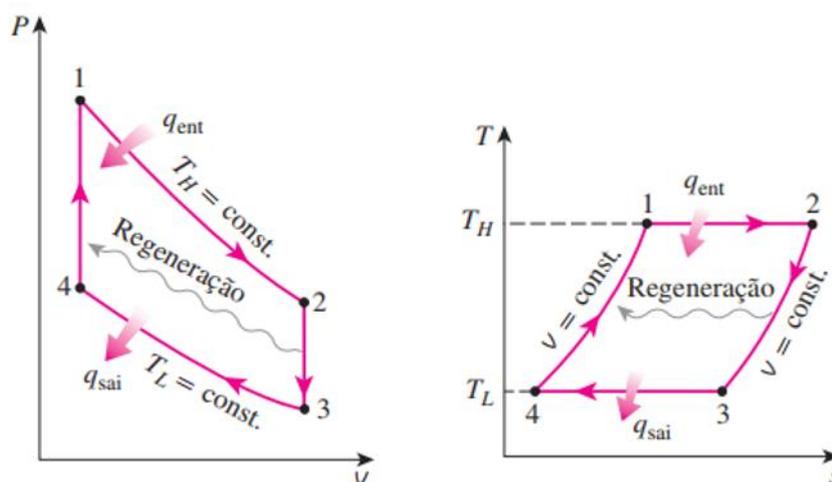


Figura 5: Diagramas P-V e T-s do ciclo Stirling.

Fonte: (ÇENGEL, et al., 2013)

O ciclo de Stirling é um ciclo totalmente reversível, portanto, para o mesmo limite de temperatura tem a mesma eficiência térmica que a do ciclo de Carnot, ou seja:

$$\eta_{t,Stirling} = \eta_{t,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (3.1)$$

Onde:

T_L – é a temperatura do corpo de baixa temperatura, °C

T_H – é a temperatura do corpo de alta temperatura, °C

a) 1 – 2: Expansão isotérmica

Durante o processo 1-2, o calor é transferido para o gás a T_H de uma fonte a alta temperatura.

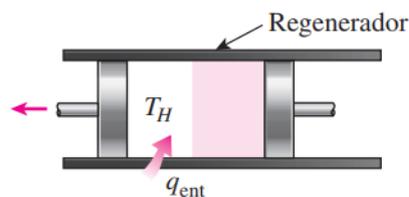


Figura 6: Processo 1-2: Expansão isotérmica do fluido de trabalho.

Fonte: (ÇENGEL, et al., 2013)

À medida que o gás expande isotermicamente, o pistão da esquerda move-se para fora, realizando trabalho, e a pressão do gás diminui, ou seja:

$$dU = 0 \quad Q_{1-2} = n \cdot R \cdot T_H \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) [kJ] \quad (3.2)$$

Onde:

n – é a quantidade de substância do gás

R – é a constante do gás ideal, $kJ/kg \cdot K$

V_2 – é o volume depois da expansão do gás (no instante 2), m^3

V_1 – é o volume antes da expansão do gás (no instante 1), m^3

b) 2 – 3: Rejeição de calor isocórica

Neste processo, ambos pistões se deslocam para a direita à mesma velocidade (mantendo o volume constante) até que todo o fluido de trabalho seja forçado para a câmara da direita.



Figura 7: Processo 2-3: Rejeição de calor a volume constante.

Fonte: (ÇENGEL, et al., 2013)

À medida que o fluido de trabalho passa pelo regenerador, calor é transferido para o regenerador e a temperatura do fluido cai de T_H para T_L , ou seja:

$$W = 0 \quad q_{2-3} = n \cdot c_v \cdot (T_L - T_H) \quad (3.3)$$

Onde:

c_v – é o calor específico a volume constante, $kJ/kg \cdot K$

c) 3 – 4: Compressão isotérmica

Durante este processo, o pistão da direita movimentar-se para dentro, comprimindo o gás.

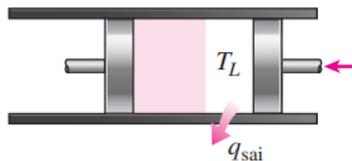


Figura 8: Processo 3-4: Compressão isotérmica do gás.

Fonte: (ÇENGEL, et al., 2013)

O balanço de energia é:

$$dU = 0 \quad Q_{3-4} = n \cdot R \cdot T_L \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right), [kJ] \quad (3.4)$$

Onde:

V_3 – é o volume do gás antes da compressão (no instante 3), m^3

V_4 – é o volume do gás depois da compressão (no instante 4), m^3

d) 4 – 1: Adição de calor isocórica

Finalmente, no processo 4-1, ambos os pistões se movimentam para a esquerda a mesma velocidade (mantendo o volume constante), forçando todo o gás para a câmara da esquerda.

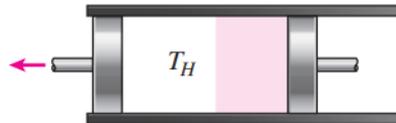


Figura 9: Processo 4-1: Aquecimento a volume constante.

Fonte: (ÇENGEL, et al., 2013)

A temperatura do gás se eleva de T_L para T_H quando ele passa do regenerador e recolhe a energia térmica nele armazenada durante o processo 2-3. Ou seja:

$$W = 0 \quad q_{4-1} = n \cdot c_v \cdot (T_H - T_L), [kJ] \quad (3.5)$$

3.2. FLUIDO DE TRABALHO

O fluido de trabalho é um gás ou líquido dentro de um sistema fechado que facilita o funcionamento desse mesmo sistema, tal como aquecimento, resfriamento ou geração de electricidade (MACMAHON, 2022). De forma geral, o fluido de trabalho é uma substância que absorve ou transmite energia (MELO, et al., 2018).

No caso de um motor Stirling, o fluido de trabalho é um gás que pode ser: ar, metano, Hidrogénio e Hélio (HOLTZ, et al., 1988).

O metano e o ar são gases mais pesados em comparação com o hidrogénio e o hélio, o que resulta numa redução da eficiência do motor, devido ao baixo coeficiente de transferência de calor e alta viscosidade. Por outro lado, o hidrogénio tem uma maior capacidade de transferência de calor do que o hélio, no entanto, seu baixo peso molecular o torna difícil de vedar dentro do sistema (HOLTZ, et al., 1988).

3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MOTOR STIRLING

3.3.1. Vantagens

As principais vantagens que os motores Stirling apresenta em comparação com os motores de combustão interna e as máquinas a vapor são:

- Causam pouca poluição;
- Têm uma operação silenciosa e geram pouca vibração;
- Podem utilizar praticamente qualquer fonte de calor para o seu funcionamento;
- Têm um alto rendimento térmico;
- Possuem facilidade de manutenção.

3.3.2. Desvantagens

- Alto custo de produção devido à sua pouca popularidade;
- Dificuldade de variar a velocidade de rotação do motor;
- Dificuldade de manter o gás pressurizado (vedação) dentro das câmaras.

3.4. APLICAÇÃO DO MOTOR STIRLING

O uso dos motores Stirling pode ser dividido em três principais categorias (PLANAS, 2018):

- Sistemas de geração eléctrica;
- Accionamento mecânico; e
- Aquecimento e resfriamento.

3.4.1. Geração de energia eléctrica

a) Energia Nuclear

A utilização dos motores Stirling em usinas nucleares tem a vantagem de para além de simplificar a usina, produz maior eficiência e reduzir subprodutos radioactivos.

b) Energia Solar

O calor necessário para accionar o motor é conseguido por meio de um prato concentrador de energia solar que rastreia o sol e usa painéis circulares cobertos de membranas metálicas e espelhos para focalizar o calor para a câmara de expansão do

motor Stirling, que converte o calor em electricidade girando um eixo associado a um gerador (ANTÃO, 2010).



Figura 10: Concentrador de disco parabólico.

Fonte: (MUÑUZ, 2010)

O motor Stirling pode converter com melhor eficiência a energia solar em electricidade do que as células fotovoltaicas não concentradas (PLANAS, 2018).

c) Gerador de Radioisótopos Stirling

Este motor, foi desenvolvido nos laboratórios dos Estados Unidos para uso na exploração do espaço que pode durar algumas décadas. É usado para gerar electricidade para sondas espaciais (ANTÃO, 2010).

d) Sistema combinado de calor e energia (CHP)

Nesse sistema, o calor residual emitido pelo motor é usado para fornecer uma aplicação de aquecimento secundário, como aquecimento de ambientes comerciais, de água residencial ou um processo industrial ou agrícola. Neste último, poderá gerar resíduos de biomassa que podem ser utilizados para o accionamento do motor, reduzindo deste modo, o descarte de resíduos (PLANAS, 2018).

3.4.2. Accionamento mecânico e propulsão

A aplicação dos motores Stirling em motores automotivos, de aeronaves, e ainda em veículos eléctricos é essencialmente difícil devido ao facto de não se controlar o tempo de partida do motor associado a baixa densidade de potência que os motores Stirling apresentam.

Por outro lado, a sua aplicação em submarinos é mais adequada, já que o trabalho eléctrico ou mecânico é necessário em nível intermitente e contínuo. Na Suécia, em Malmo, a United Stirling está a desenvolver um motor experimental de quatro cilindros para uso em sistemas de abastecimento subaquático (PLANAS, 2018).

Os motores Stirling também podem ser usados para accionar bombas para mover fluidos como água, ar e gases (PLANAS, 2018).

3.4.3. Aquecimento e resfriamento

Um motor Stirling alimentado com energia mecânica funciona ao contrário como uma bomba de calor, podendo ser utilizado para fins de refrigeração ou aquecimento (PLANAS, 2018).

a) Refrigeração

O motor Stirling é usado principalmente na criogenia. Tendo sido usado inicialmente em plantas de produção de ar líquido, actualmente, a *Stirling Cryogenics BV*, na Holanda está desenvolvendo e fabricando resfriadores criogénicos Stirling e sistemas de resfriamento criogénico.

Os crio-refrigeradores Stirling são a tecnologia de melhor desempenho para resfriamento de sensores electrónicos e microprocessadores (PLANAS, 2018).

b) Aquecimento

As Bombas de calor Stirling, são usadas para aquecimentos de compartimentos (edifícios). Estas bombas exigem para o seu funcionamento entrada de energia mecânica que pode ser fornecida por um motor eléctrico, um motor de combustão interna, ou mesmo por um outro motor Stirling (PLANAS, 2018).

3.5. TIPOS DE MOTOR STIRLING

Os motores Stirling são classificados de acordo com a disposição do pistão, dos quais, são destaque os tipos Alfa, Beta e Gama. Todos os tipos de motor Stirling são regidos pelo mesmo ciclo termodinâmico (BARROS, 2005 apud DIAS, 2016).

3.5.1. Motor Stirling tipo Alfa

O motor tipo Alfa possui dois pistões um de expansão e outro de compressão, que são defasados em 90° (PAUTZ, 2013). Há um lado quente (espaço de expansão) e um lado frio (espaço de compressão) unidos entre si. Os dois pistões fazem fluir o gás entre ambos os espaços (espaço de expansão e de compressão) e são responsáveis por gerar a potência.

Este tipo de motor caracteriza-se por um arranjo simples de dois cilindros em separados que são conectados em série por um aquecedor, um regenerador e um resfriador (MELLO, 2001 apud PAUTZ, 2013).

Embora o motor Alfa possua a configuração mais simples, e uma relação potência-volume mais elevada, apresenta a desvantagem de ambos os pistões necessitarem de vedação por conter o fluido de trabalho (FURTADO, et al., 2014).

3.5.1.1. Funcionamento

Nos motores tipo Alfa, o sistema é completamente fechado, o que provoca o aquecimento e o arrefecimento do gás para locais de temperaturas diferentes do sistema.

- a) **1 – 2: Expansão isotérmica** – Durante este processo, ocorre expansão do gás dentro do cilindro quente devido ao aquecimento, e realiza-se trabalho. Neste momento, o pistão quente desloca-se para a direita e o pistão de frio desloca-se para baixo.
- b) **2 – 3: Rejeição de calor isocórica** – Devido à inércia, maior parte do gás é conduzida para o cilindro frio onde ocorre a rejeição de calor e perda de pressão, nesse instante verifica-se uma rotação de 90° da cambota.
- c) **3 – 4: Compressão isotérmica** – Durante este processo, ambos os pistões se movimentam de forma a comprimir o gás do sistema, enquanto calor é rejeitado, mantendo a temperatura constante.
- d) **4 – 1: Adição de calor isocórica** – o pistão de frio desloca-se para cima, enquanto o pistão quente desloca-se para a direita. Devido à inércia verifica-se novamente uma rotação de 90° e há transferência do gás para o cilindro quente de modo a completar o ciclo.

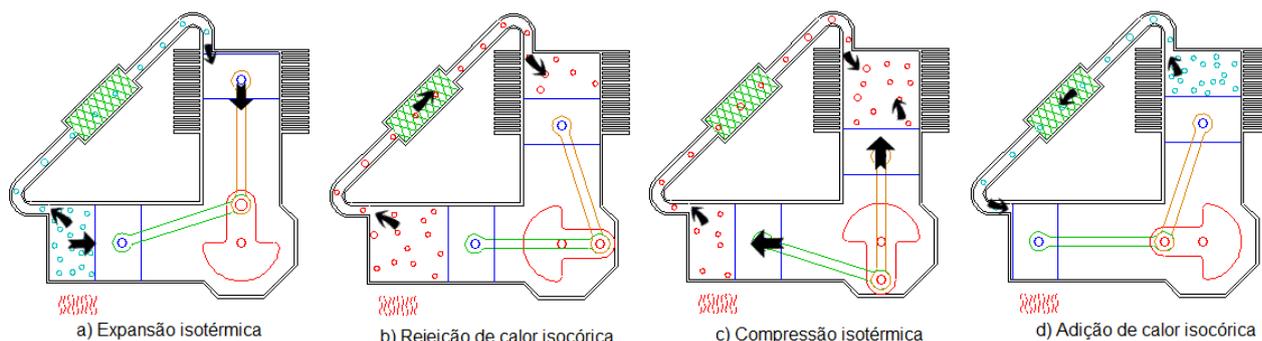


Figura 11: Funcionamento do motor tipo Alfa.

Fonte: (PEREIRA, 1999) adaptado

3.5.2. Motor Stirling tipo Beta

O motor tipo Beta assim como o tipo Gama são chamados de motores Stirling de deslocamento, sendo que o gás de trabalho é movimentado entre os espaços de alta e baixa temperatura pelo pistão de deslocamento. E a expansão e a compressão do gás são feitas pelo pistão de trabalho (PEREIRA, 1999).

Nos motores Beta, os pistões de deslocamento e de trabalho estão alinhados em um único cilindro. A sobreposição entre cada movimento de ambos os pistões garante maior taxa de compressão e pode-se obter maior potência que o motor tipo Gama. Entretanto, as hastes do pistão de deslocamento e o de trabalho estão alinhadas, o que torna o mecanismo complicado (PAUTZ, 2013).

3.5.2.1. Funcionamento

Nas etapas de funcionamento do motor tipo Beta, o pistão de trabalho está representado a cinza escuro e o pistão de deslocamento caracteriza-se por um cinza claro.

- a) **1 – 2: Expansão isotérmica** – nesta etapa o gás é aquecido pela fonte quente com o objectivo de se obter uma expansão à temperatura constante.
- b) **2 – 3: Rejeição de calor isocórica** – devido à inércia do movimento, o pistão de deslocamento desloca-se para baixo, movimentando o gás para a extremidade do cilindro, neste processo o gás é resfriado e sua pressão reduz até à inicial.
- c) **3 – 4: Compressão isotérmica** – o pistão de trabalho movimenta-se para baixo e o gás é comprimido. O gás é resfriado para se realizar compressão a uma temperatura constante.

- d) **4 – 1: Adição de calor isocórica** – dado que o gás se encontra comprimido pelo pistão de trabalho, o pistão de deslocamento é forçado a subir e o gás é aquecido.

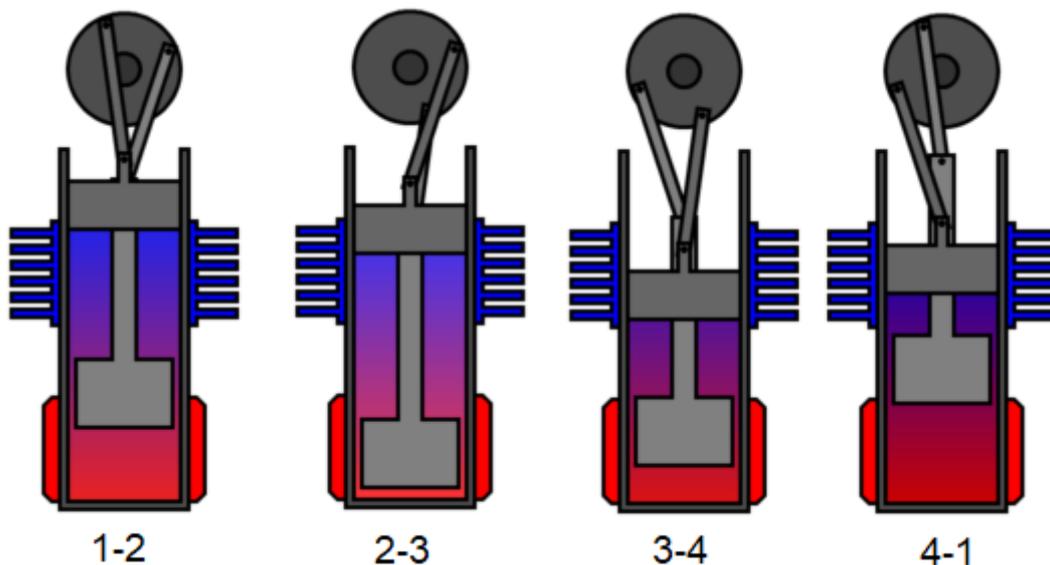


Figura 12: Funcionamento do motor tipo Beta.

Fonte: (PEREIRA, 1999) adaptado

3.5.3. Motor Stirling tipo Gama

Um motor tipo Gama difere do tipo Beta simplesmente tem o pistão de trabalho montado em um cilindro separado ao lado do cilindro do pistão de deslocamento, mas ainda conectado ao mesmo volante. O gás nos dois cilindros pode fluir livremente entre eles e permanece como um único corpo (TORAL, 2015).

Esta configuração é mais simples, e ajustes na taxa de compressão e incremento da área de transferência de calor, são relativamente fáceis de se obter. Neste caso, a diferença entre a temperatura da mão e o ar ao redor é suficiente para o motor conseguir funcionar (PEREIRA, 1999).

3.5.3.1. Funcionamento

- a) **1 – 2: Expansão isotérmica:** o gás recebe calor de uma fonte externa, aumentando a pressão no motor, e o pistão de trabalho é movimentado para baixo, realizando trabalho.
- b) **2 – 3: Rejeição de calor isocórica:** O pistão de deslocamento é movimentado para cima, fazendo o gás passar para o espaço de compressão, onde é resfriado, e reduzindo a sua pressão até à inicial.

- c) **3 – 4: Compressão isotérmica:** o pistão de trabalho é movimentado para cima, comprimindo o gás enquanto é resfriado, mantendo a temperatura constante.
- d) **4 – 1: Adição de calor isocórica:** O pistão de deslocamento é movimentado para baixo, fazendo o gás passar para o espaço de expansão, recebendo calor de fonte externa e elevando a pressão.

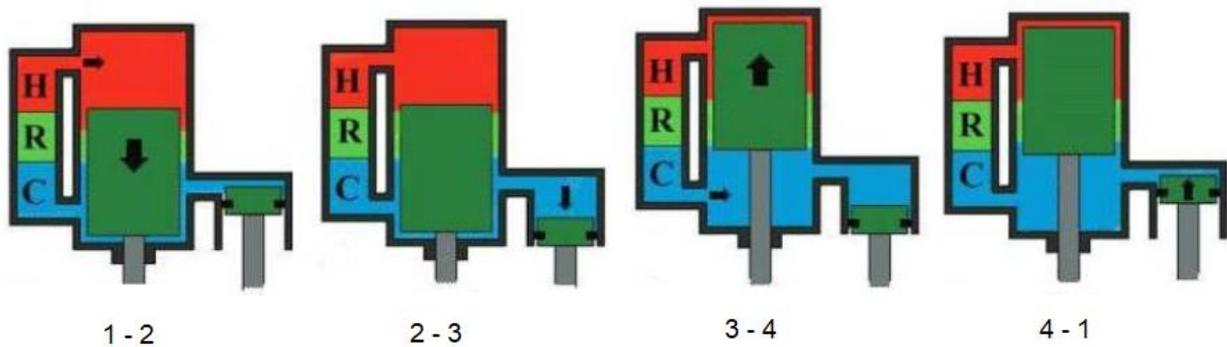


Figura 13: Funcionamento do motor tipo Gama

Fonte: (PAUTZ, 2013) adaptado

3.6. TEORIA DE SCHMIDT PARA O MOTOR STIRLING

Em 1871, isto é, 55 anos a invenção do motor Stirling, Gustav Schmidt desenvolveu uma análise do ciclo termodinâmico para este tipo de motores. A teoria de Schmidt mantém as considerações de compressão e expansão isotérmica, e a regeneração perfeita, sendo, portanto, altamente idealizada, mas mais realista do que o ciclo Stirling ideal (CRUZ, 2012).

Através da teoria de Schmidt consegue-se estimar a potência e rendimento de um motor Stirling, devido às simplificações que essa teoria faz (PAUTZ, 2013).

A teoria de Schmidt é um dos métodos de cálculo isotérmico para os motores Stirling. É um método mais simples e muito usado durante o desenvolvimento do motor. Esta teoria é baseada na expansão e compressão isotérmica de um gás ideal (Hirata 1997 apud CRUZ, 2012). Neste método, a temperatura é mantida constante, o que na prática não se verifica com tanta perfeição (PAUTZ, 2013).

O desempenho de um motor Stirling é estimado utilizando um diagrama P-V. O volume do motor é calculado a partir da geometria do motor em análise. Essa estimativa permite calcular a pressão através da equação 3.6:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (3.6)$$

Onde:

P – é a pressão, Pa

V – é o volume, m^3

m – é a massa, kg

R – é a constante universal dos gases, $J/kg \cdot K$

T – é a temperatura, K

A análise da teoria de Schmidt foi realizada tendo algumas considerações prévias de operação (HIRATA, 1997 apud DIAS, 2016):

- a. Durante as trocas de calor não há perdas, também não há diferença interna de pressão;
- b. Os processos de expansão e compressão são isotérmicos;
- c. O gás de trabalho é considerado ideal;
- d. Não há perdas no regenerador quando esse existir, ou seja, regeneração perfeita;
- e. O volume morto de expansão mantém a temperatura do gás na expansão (T_E), e o volume morto de compressão mantém a temperatura de compressão do gás (T_C);
- f. A temperatura do regenerador é uma média aritmética das temperaturas dos cilindros de expansão (T_E) e de compressão (T_C);
- g. O volume de expansão (V_E) e o de compressão (V_C) variam conforme uma curva senoidal.

A tabela 1, mostra todas as variáveis que fazem parte da teoria de Schmidt, e também suas unidades de medidas. Estas variáveis serão usadas para explicar a teoria e cálculo do motor que será depois desenvolvido.

Tabela 1: Variáveis usadas na teoria de Schmidt

Variável	Símbolo	Unidade
<i>Pressão do motor</i>	P	Pa
<i>Volume percorrido pelo pistão de expansão ou de deslocamento</i>	V_{SE}	m^3
<i>Volume percorrido pelo pistão de compressão ou de trabalho</i>	V_{SC}	m^3
<i>Volume morto do cilindro de expansão</i>	V_{DE}	m^3
<i>Volume do regenerador</i>	V_R	m^3
<i>Volume morto do cilindro de compressão</i>	V_{DC}	m^3
<i>Volume momentâneo do cilindro de expansão</i>	V_E	m^3
<i>Volume momentâneo do cilindro de compressão</i>	V_C	m^3
<i>Volume momentâneo total</i>	V	m^3
<i>Massa total do gás de trabalho</i>	m	kg
<i>Constante universal dos gases</i>	R	$j/kg \cdot K$
<i>Temperatura do gás no cilindro de expansão</i>	T_E	K
<i>Temperatura do gás no cilindro de compressão</i>	T_C	K
<i>Temperatura do gás no regenerador</i>	T_R	K
<i>Ângulo fase</i>	φ	$^\circ$
<i>Temperatura relativa</i>	t	-
<i>Volume percorrido relativo</i>	v	-
<i>Volume morto relativo</i>	X	-
<i>Velocidade de rotação do motor</i>	n	Hz
<i>Energia de expansão</i>	E_E	J
<i>Energia de compressão</i>	E_C	J
<i>Energia do motor</i>	E_i	J
<i>Potência de expansão</i>	L_E	W
<i>Potência de compressão</i>	L_C	W
<i>Potência do motor</i>	L_i	W
<i>Eficiência do motor</i>	η	-

Fonte: (HIRATA, 1997 apud FURTADO, et al., 2014)

3.6.1. Teoria de Schmidt no motor Stirling tipo Gama

A figura abaixo apresenta um esquema mostrando as principais variáveis: os volumes, as temperaturas e a pressão nos espaços de expansão e de compressão de um modelo de Schmidt para o motor Stirling tipo Gama.

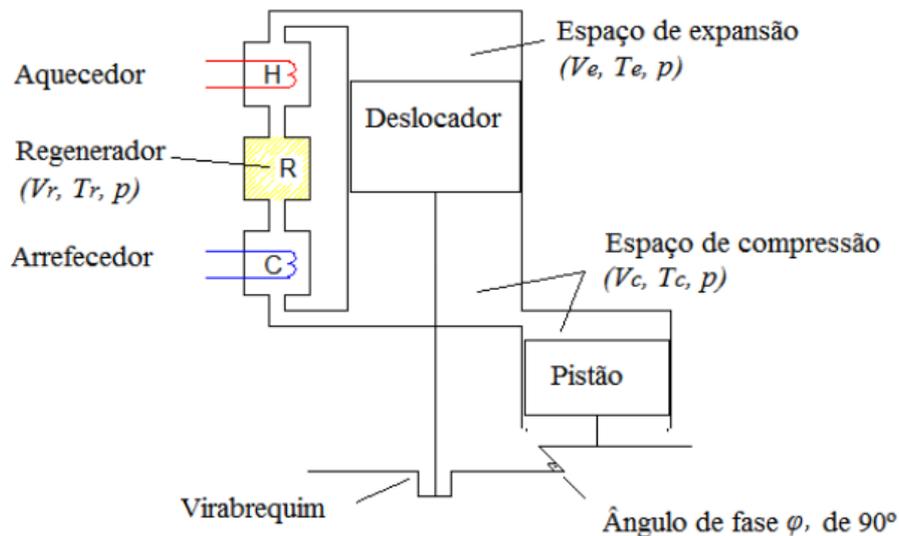


Figura 14: Esquema de um motor Stirling tipo Gama.

Fonte: (DIAS, 2016)

O volume morto é definido como o espaço livre que fica acima do pistão quando este está no ponto morto superior (PMS). O volume morto de um *design* prático de um motor Stirling, deve ser cerca de 58% do volume total (MARTINI apud FURTADO, et al., 2014).

3.6.1.1. Volume, temperatura e pressão

O cálculo do volume do espaço de expansão, V_E , em função do volume deslocado pelo pistão deslocador, V_{SE} , o volume morto do espaço de expansão, V_{DE} , e o ângulo rotação, θ , do virabrequim, é feito pela seguinte equação:

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos\theta) + V_{DE} \quad (3.7)$$

O volume do espaço de compressão é calculado em função do volume percorrido pelo pistão de trabalho, V_{SE} , o volume morto do espaço de compressão, V_{DC} , o ângulo de rotação do virabrequim, θ , e o ângulo de fase, φ , pela equação:

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos\theta) + \frac{V_{SC}}{2}[1 - \cos(\theta - \varphi)] + V_{DC} \quad (3.8)$$

O volume total, é dado pela equação 3.9, sendo V_R , o volume do regenerador:

$$V = V_E + V_C + V_R \quad (3.9)$$

A temperatura relativa, t , e o volume percorrido relativo, v , são dados pelas razões dos espaços de compressão e expansão:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (3.10)$$

$$v = \frac{V_C}{V_E} \quad (3.11)$$

Os volumes mortos relativos, X , são dados pelas razões dos volumes mortos nos espaços de compressão, V_{DC} , de expansão V_{DE} , e no regenerado, V_R pelo volume percorrido pelo pistão de expansão, V_{SE} :

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (3.12)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (3.13)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (3.14)$$

A temperatura do regenerador, T_R , é calculada a partir da suposição da alínea f. apresentadas por Dias 2016:

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (3.15)$$

Pelas suposições das alíneas a), b) e c) apresentadas por Dias 2016, a massa total, m , de gás contida no motor é calculada em função da pressão, P , das temperaturas T_E , T_C e T_R , dos volumes, V_E , V_C e V_R e da constante universal do gás, R :

$$m = \frac{P \cdot V_E}{R \cdot T_E} = \frac{P \cdot V_C}{R \cdot T_C} = \frac{P \cdot V_R}{R \cdot T_R} \quad (3.16)$$

A equação anterior, pode ser modificada pelas equações (3.10) e (3.15), passando a massa total, m , do gás a ser:

$$m = \frac{P}{R \cdot T_C} \left(t \cdot V_E + \frac{2 \cdot v \cdot V_R}{1+t} + V_C \right) \quad (3.17)$$

Utilizando as equações (3.7) e (3.9), a massa total, m , é calculada por:

$$m = \frac{P \cdot V_{SE}}{2 \cdot R \cdot T_C} [S - B \cdot \cos(\theta - a)] \quad (3.18)$$

Onde:

$$a = tg^{-1} \left(\frac{v \cdot \text{sen}\varphi}{t + \text{cos}\varphi} \right) \quad (3.19)$$

$$S = t + 2 \cdot t \cdot X_{DE} + \frac{4 \cdot t \cdot X_R}{1+t} + v + 2 \cdot X_{DC} \quad (3.20)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1) \cdot v \cdot \text{cos}\varphi + v^2 - 2 \cdot t + 1} \quad (3.21)$$

A pressão do gás, P , no ciclo é expressa pela equação:

$$P = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T_C}{V_{SE} [S - B \cdot \text{cos}(\theta - a)]} \quad (3.22)$$

A pressão média do gás, $P_{m\acute{e}dia}$, no ciclo é dada por:

$$P_{m\acute{e}dia} = \frac{1}{2\pi} \oint P d\theta = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T_C}{V_{SE} \cdot \sqrt{S^2 - B^2}} \quad (3.23)$$

A pressão do gás, P , no ciclo também pode ser expressão em função da pressão média do gás, $P_{m\acute{e}dia}$:

$$P = \frac{P_{m\acute{e}dia} \cdot \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \text{cos}(\theta - a)} \quad (3.24)$$

Onde:

$$c = \frac{B}{S} \quad (3.25)$$

Dependendo do valor da expressão $\text{cos}(\theta - a)$, a pressão do gás no motor pode ser mínima e máxima, para $\text{cos}(\theta - a) = -1$, e $\text{cos}(\theta - a) = 1$, respectivamente, podendo ser definida:

$$P = \frac{P_{min} \cdot (1+c)}{1 - c \cdot \text{cos}(\theta - a)} \quad (3.26)$$

$$P = \frac{P_{m\acute{a}x} \cdot (1-c)}{1 - c \cdot \text{cos}(\theta - a)} \quad (3.27)$$

As relações entre as pressões mínima, P_{min} , máxima, P_{max} e média, $P_{m\acute{e}dia}$, são:

$$\frac{P_{min}}{P_{m\acute{e}dia}} = \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \quad (3.28)$$

$$\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{e}dia}} = \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \quad (3.29)$$

3.6.1.2. Energia, potência e eficiência

A energia (área do diagrama P-V) para a expansão e para a compressão pode ser calculada com base nos coeficientes acima indicados. A energia de expansão, E_E , pode ser dada em função das pressões média, $P_{média}$, mínima, P_{min} , e máxima, $P_{máx}$:

$$E_E = \oint P \cdot dV_E = \frac{P_{média} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (3.30)$$

$$E_E = \oint P \cdot dV_E = \frac{P_{min} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad (3.31)$$

$$E_E = \oint P \cdot dV_E = \frac{P_{max} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (3.32)$$

Igualmente, a energia de compressão, E_C , pode ser dada em função das pressões média, $P_{média}$, mínima, P_{min} , e máxima, $P_{máx}$:

$$E_C = \oint P \cdot dV_C = -\frac{P_{média} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot t \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (3.33)$$

$$E_C = \oint P \cdot dV_C = -\frac{P_{média} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot t \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad (3.34)$$

$$E_C = \oint P \cdot dV_C = -\frac{P_{média} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot t \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (3.35)$$

A energia do ciclo do motor, E_i , é dada pela soma das energias de compressão, E_C , e de expansão, E_E :

$$E_i = \frac{P_{média} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot (1 - t) \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (3.36)$$

$$E_i = \frac{P_{média} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot (1 - t) \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad (3.37)$$

$$E_i = \frac{P_{média} \cdot V_{SE} \cdot \pi \cdot c \cdot (1 - t) \cdot s \cdot e \cdot n \cdot a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (3.38)$$

As potências de expansão, W_E , de compressão, W_C , e do ciclo do motor, são calculadas com base na rotação do motor, n , de acordo com as seguintes equações:

$$W_E = E_E \cdot n \quad (3.39)$$

$$W_C = E_C \cdot n \quad (3.40)$$

$$W_i = E_i \cdot n \quad (3.41)$$

A eficiência térmica do motor, η_t , é a razão entre a energia rejeitada, E_i , pelo ciclo pela energia que entra no ciclo, E_E , e mostra quanto da energia fornecida ao sistema foi convertida em trabalho, assim:

$$\eta_t = \frac{E_i}{E_E} = 1 - t \quad (3.42)$$

CAPÍTULO IV

4. TRABALHO REALIZADO

4.1. DESCRIÇÃO GERAL DO PROTÓTIPO

Para a realização deste trabalho, foi escolhido o motor Stirling tipo Gama, dada a acessibilidade dos materiais para a sua construção e facilidade e simplicidade de fabricação.

O protótipo do motor é idealizado sob o ponto de vista didático, onde é utilizada uma chama como fonte de calor para o seu accionamento. O motor funcionará a temperaturas baixas devido ao material utilizado para a sua construção.

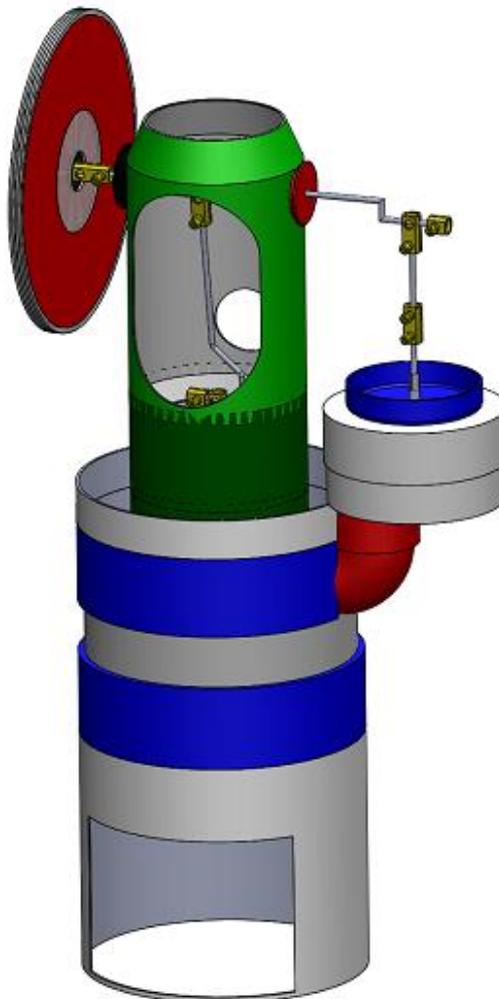


Figura 15: Desenho esquemático do motor.

Fonte: O autor

A figura 16 mostra uma vista explodida e lista de materiais e sua função no protótipo construído.

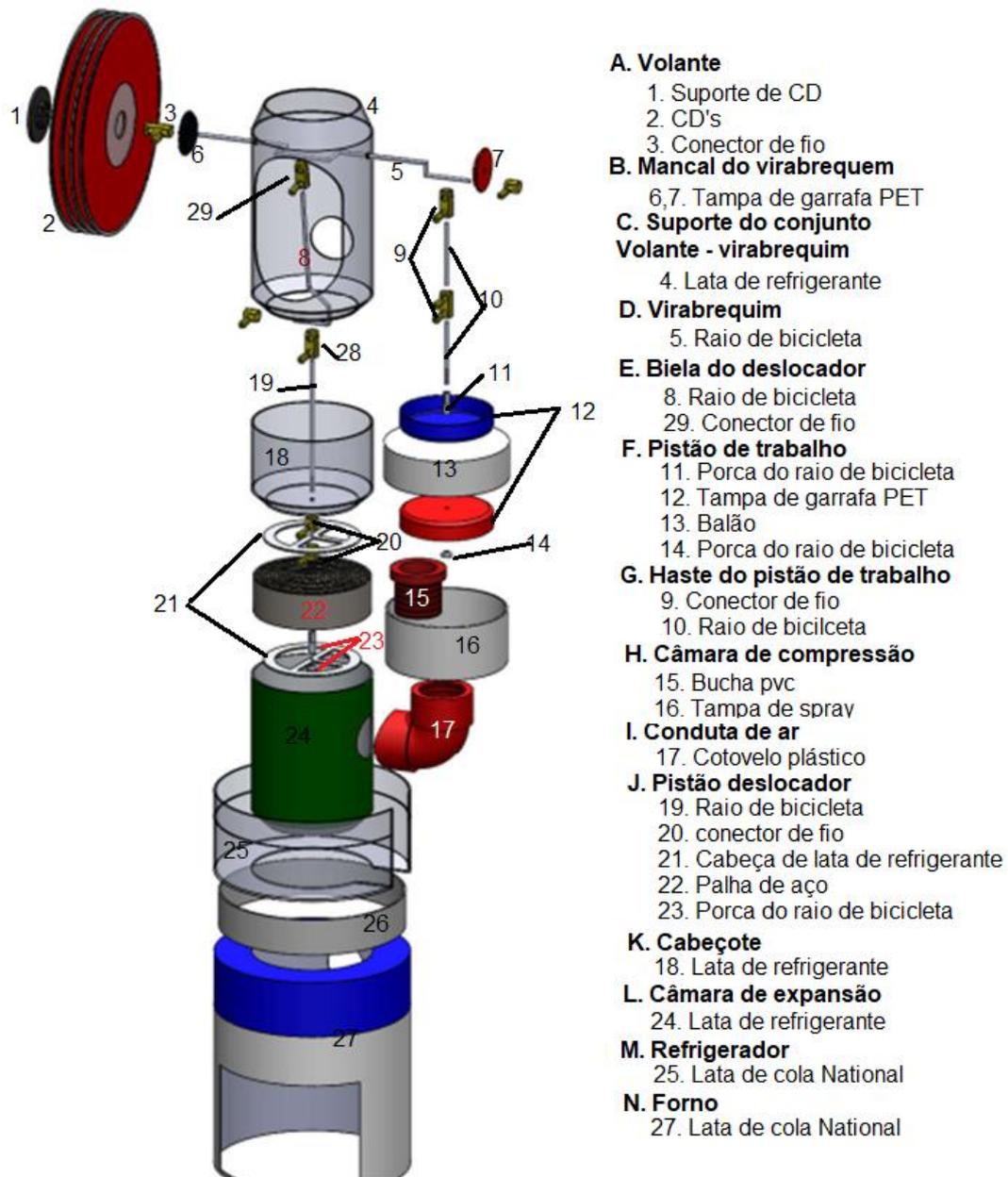


Figura 16: Vista explodida do protótipo construído.

Fonte: O autor

4.2. CÂMARA QUENTE E PISTÃO DE DESLOCAMENTO

A câmara de alta temperatura do motor foi construída a partir de lata de alumínio de 330 ml, o diâmetro da câmara é de 65 mm e tem um comprimento de 85 mm. Foi feito um furo para permitir a união desta câmara com a câmara de baixa temperatura.

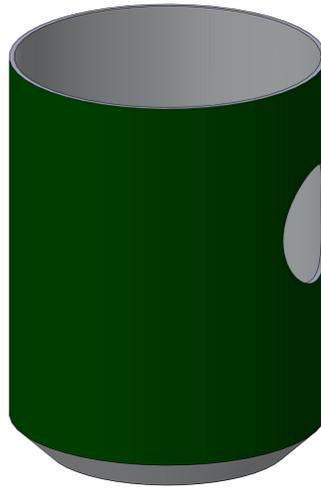


Figura 17: Câmara quente.

Fonte: O autor

Como pistão de deslocamento foi utilizado um raio de bicicleta de 2 mm de diâmetro enrolado por um pedaço de palha de aço e limitado por duas tampinhas (fecho de lata) num comprimento de 20 mm. O diâmetro do pistão é aproximadamente igual ao diâmetro interno da câmara quente. Foram usadas a porca do raio de bicicleta e duas metades do conector de fio² para a montagem do pistão de deslocamento.



Figura 18: Vista geral e explodida do pistão de deslocamento.

Fonte: O autor

² Parte metálica removida de uma barra de junção.

4.3. CÂMARA FRIA E PISTÃO DE TRABALHO

A câmara de baixa temperatura foi feita utilizando uma tampa de spray de 65 mm de diâmetro e comprimento de 30 mm. Foi feito um furo de 25 mm na base da câmara para permitir a união desta com a câmara de alta temperatura por meio de um cotovelo de 3/4".

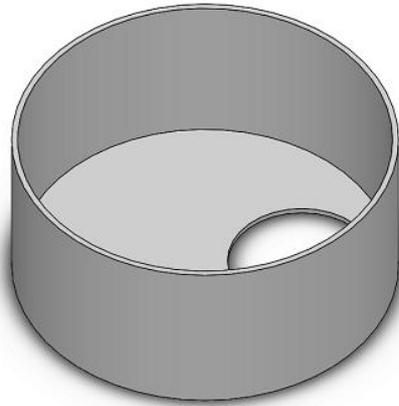


Figura 19: Câmara de trabalho.

Fonte: O autor

O pistão de trabalho foi feito com base no balão de festa, duas tampas de 50 mm de diâmetro e comprimento de 10 mm, e um raio de bicicleta de 2 mm de diâmetro que serve também como biela do pistão de trabalho.

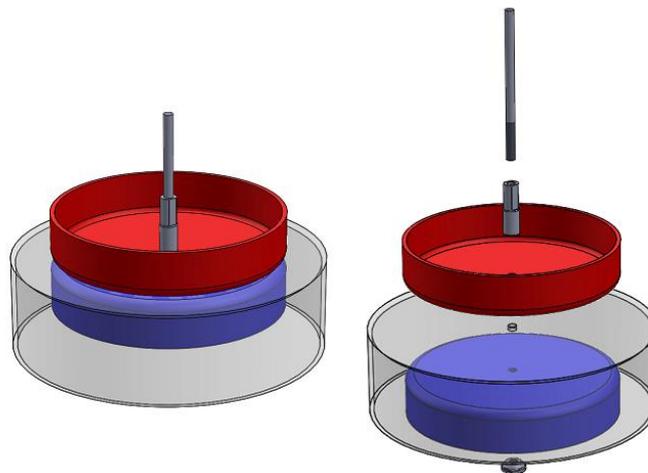


Figura 20: Vista geral e explodida do pistão de trabalho.

Fonte: O autor

4.4. VIRABREQUIM E VOLANTE

O virabrequim foi feito utilizando o raio de bicicleta de 2 mm de diâmetro, tendo sido dobrado de forma que o ângulo de defasagem entre os pistões de expansão e de compressão fosse de 90°. O pistão de expansão tem um curso de 28 mm e o de compressão um curso de 15 mm.

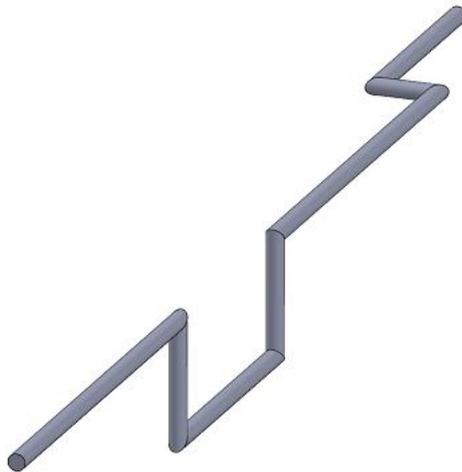


Figura 21: Virabrequim

Fonte: O autor

O volante foi feito utilizando quatro CDs, um suporte de CD e um conector de fio. O volante tem o papel de manter constante a rotação do motor.

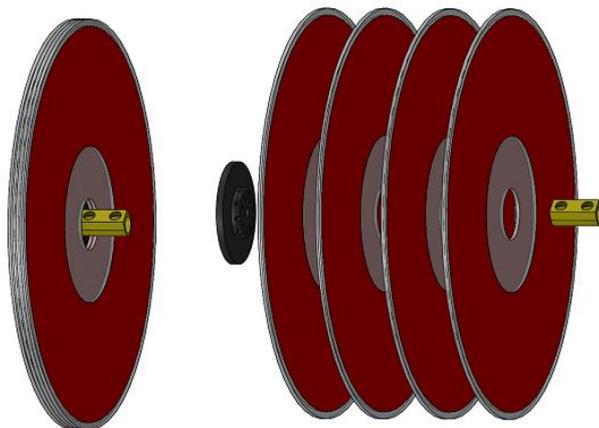


Figura 22: Vista geral e explodida do volante.

Fonte: O autor

O virabrequim e o volante são montados num suporte feito de lata de cerveja de 300 ml, o qual tem dois furos de 3 mm de diâmetro para permitir livre rotação do virabrequim. Durante a montagem do virabrequim os furos foram danificados, pelo que foram adicionadas 2 tampas de garrafas PET³ com furos centrais de 3 mm para manter os furos.

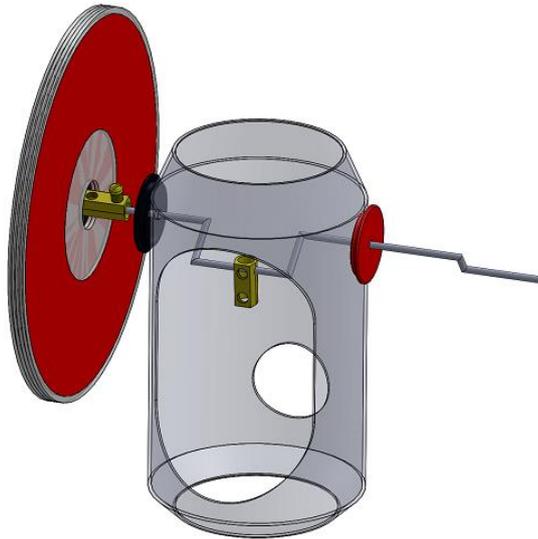


Figura 23: Montagem do virabrequim e volante no suporte.

Fonte: O autor

A tabela 2 mostra os resultados dos valores definidos para o actual projecto. O motor actual tem um volume morto de aproximadamente 56% do volume total, o que obedece os 58% definidos por Martini para um design prático de um motor Stirling.

Tabela 2: Valores definidos no projecto do protótipo do motor.

Designação	Símbolo	Valor	Unidade
Volume percorrido pelo pistão deslocador	V_{SE}	225	cm^3
Volume percorrido pelo pistão de trabalho	V_{SC}	97	cm^3
Volume morto da câmara quente	V_{DE}	135	cm^3
Volume morto da câmara fria	V_{DC}	51	cm^3
Curso do pistão deslocador	S_E	0,28	cm
Curso do pistão de trabalho	S_C	0,15	cm
Ângulo de fase	φ	90	°

Fonte: O autor

³ PET ou Polietileno tereftalato - é um polímero termoplástico

4.5. TESTES REALIZADOS

A avaliação do funcionamento do protótipo construído foi feita mediante a realização de alguns testes. A fonte de calor usada durante a avaliação do funcionamento foi um briquete de serradura (madeira), cuja matéria prima foi recolhida numa serração na cidade de Maputo. Importa referir que, no lugar deste, poderiam ser usados outros briquetes. A rotação do motor foi monitorada com auxílio de um tacómetro digital e a temperatura por meio de um pirómetro.



Figura 24: Protótipo construído.

Fonte: O autor

Para a realização dos testes foi feita a queima de briquetes de madeira. O primeiro teste foi feito usando água como meio refrigerante e, no segundo, ar ambiente como meio refrigerante do protótipo do motor.

4.5.1. Teste utilizando ar como meio refrigerante

No primeiro teste, usando o ar ambiente como refrigerador, foi monitorada a variação da temperatura da câmara quente com o passar do tempo. A câmara foi exposta a fonte de calor por um tempo total de 180 segundos (3 minutos). O gráfico 1 mostra que quanto mais tempo for exposta a câmara, maior é a temperatura que ela atinge.

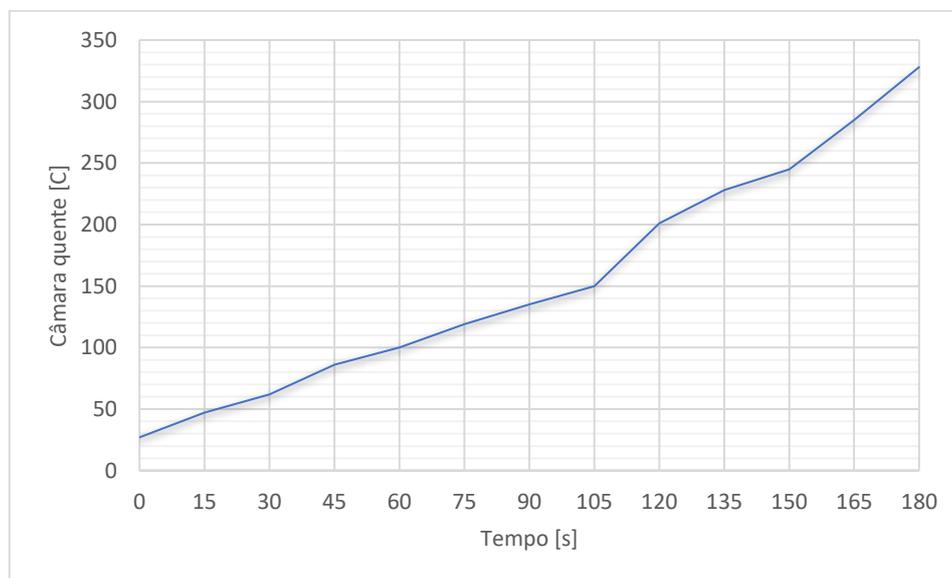


Gráfico 1: Variação da temperatura da câmara quente em função do tempo de exposição à fonte de calor.

O gráfico 2 representa a variação da rotação do motor em função da temperatura da câmara quente. Pode-se notar que a rotação aumenta com a temperatura da câmara quente, chegando até a 400 rpm a temperatura de 328 °C. O motor só começou a funcionar depois de atingir os 60 °C, o que corresponde a 30 segundos de exposição ao calor.

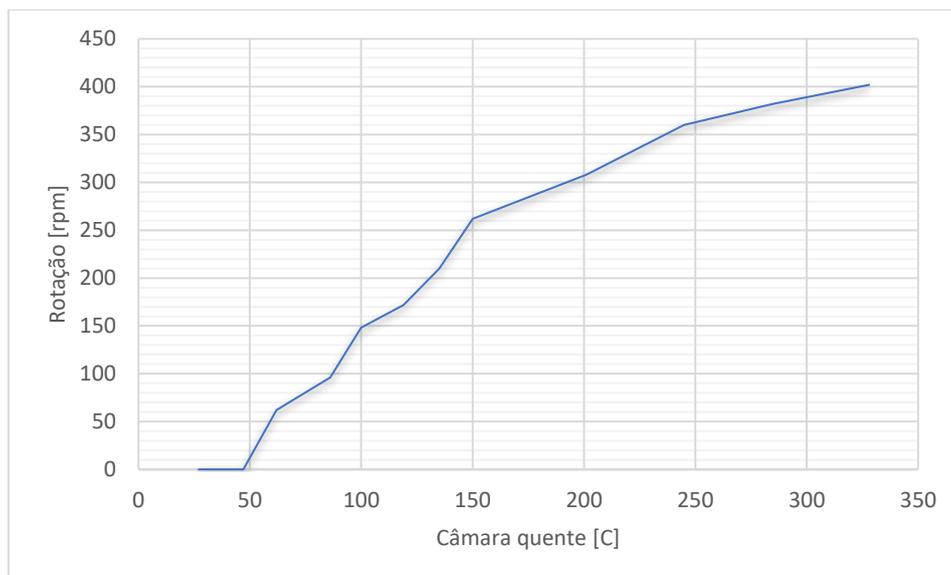


Gráfico 2: Variação da rotação em função da temperatura da câmara quente.

4.5.2. Testes utilizando água como meio refrigerante

No segundo teste foi utilizada água para resfriar o motor. O gráfico 3, mostra a variação da temperatura da câmara quente em função do tempo de exposição à fonte de calor.

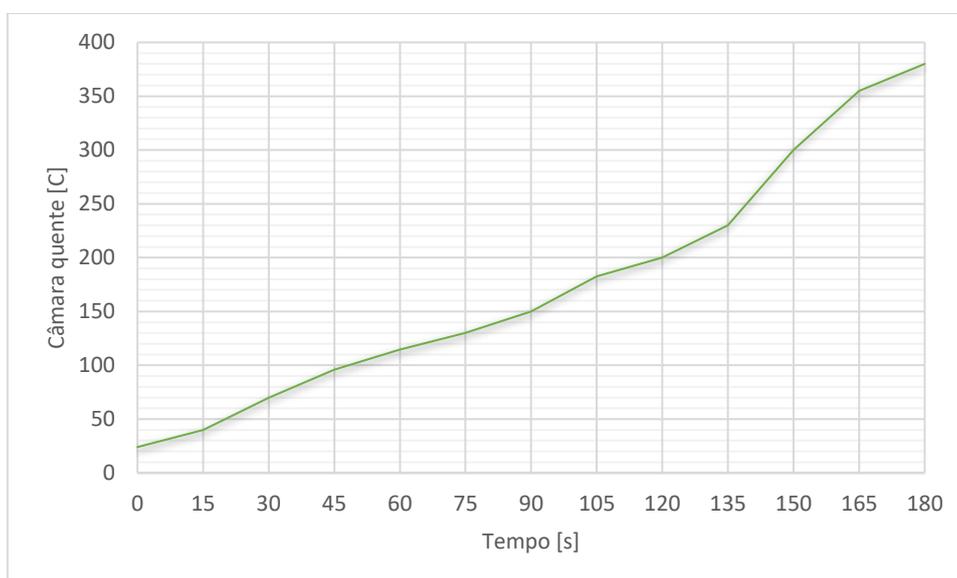


Gráfico 3: Variação da temperatura da câmara quente em função do tempo de exposição à fonte de calor.

Pode-se notar que a temperatura da câmara é proporcional ao tempo de exposição à fonte de calor. Quanto mais tempo de exposição, maior é a temperatura alcançada pela câmara de expansão.

O gráfico 4, representa a variação da rotação do motor em função da temperatura da câmara quente.

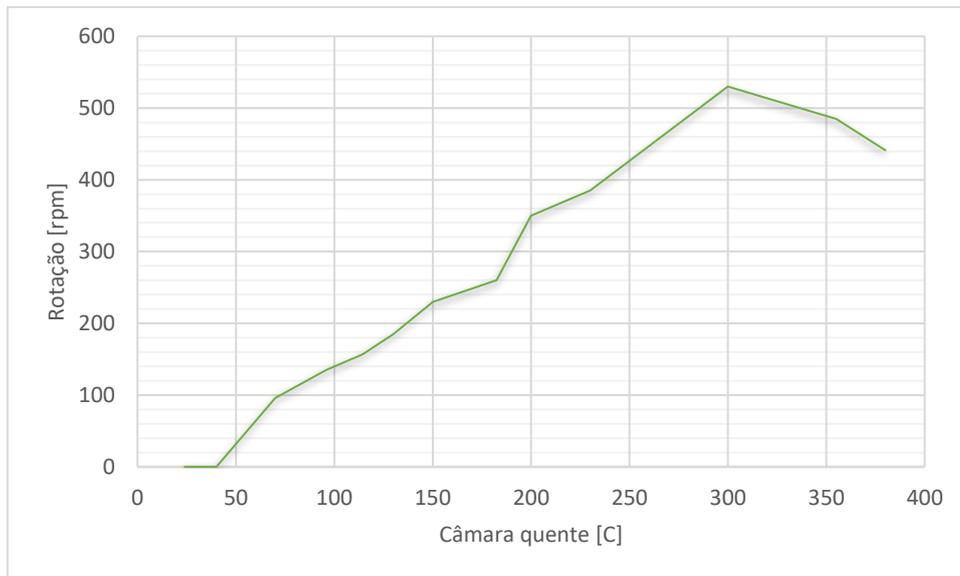


Gráfico 4: Variação da rotação em função da temperatura da câmara quente.

Nota-se que a rotação aumenta até atingir seu máximo de 530 *rpm* a 300 °C, depois disso a rotação diminui.

CAPÍTULO V

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1.1. Análise do aquecimento da câmara quente

Analisando os resultados obtidos, foi observado que o aquecimento da câmara quente não depende do meio refrigerante escolhido. Notando-se que em ambos os casos, a temperatura da câmara aumentou com o tempo de exposição.

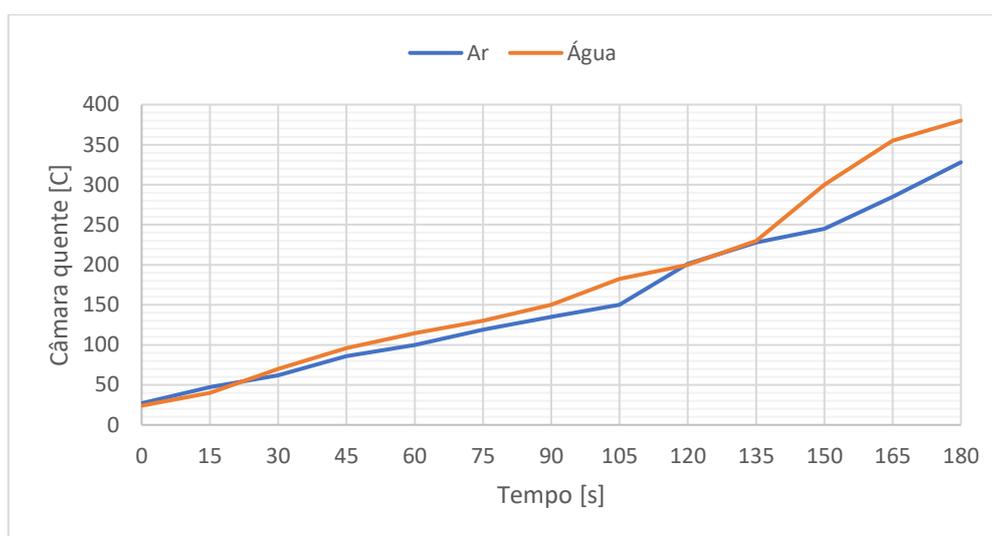


Gráfico 5: Comparação do aquecimento da câmara quente.

No entanto, é notório que entre os tempos de 0 segundo até cerca de 23 segundos ao usar ar como refrigerante a câmara quente aquece mais do que ao usar água, mas depois desse tempo até ao segundo 120, é ao usar água que se alcança maiores temperaturas na câmara quente. Entre 120 e 135 segundos o aquecimento da câmara é igual ao usar ambos refrigerantes, mas depois de 135 segundos, o aquecimento da câmara que tem água como meio refrigerante é maior que o que tem ar como meio refrigerante. Isso deve-se ao facto de a água aumentar a sua temperatura e não ser renovada.

5.1.2. Análise da rotação do motor

Para ambos os casos se nota que são necessários pelo menos 30 segundos para que o motor comece a funcionar.

O segundo caso, atingiu uma rotação máxima de 530 rpm em 150 segundos, contra os 360 rpm do primeiro caso.

Quando usado o ar como meio refrigerante, notou-se que a rotação só aumenta com o passar do tempo. Por outro lado, com a água como meio refrigerante, nota-se maiores rotações, no entanto, depois de 150 segundos de funcionamento há uma queda na rotação do motor. Concluiu-se que a impossibilidade de renovação da água durante o funcionamento do motor, faz com que depois de um certo tempo de funcionamento, a diferença de temperaturas entre a parte fria e a quente diminui causando assim perda de rotação e conseqüente perda de rendimento no funcionamento.

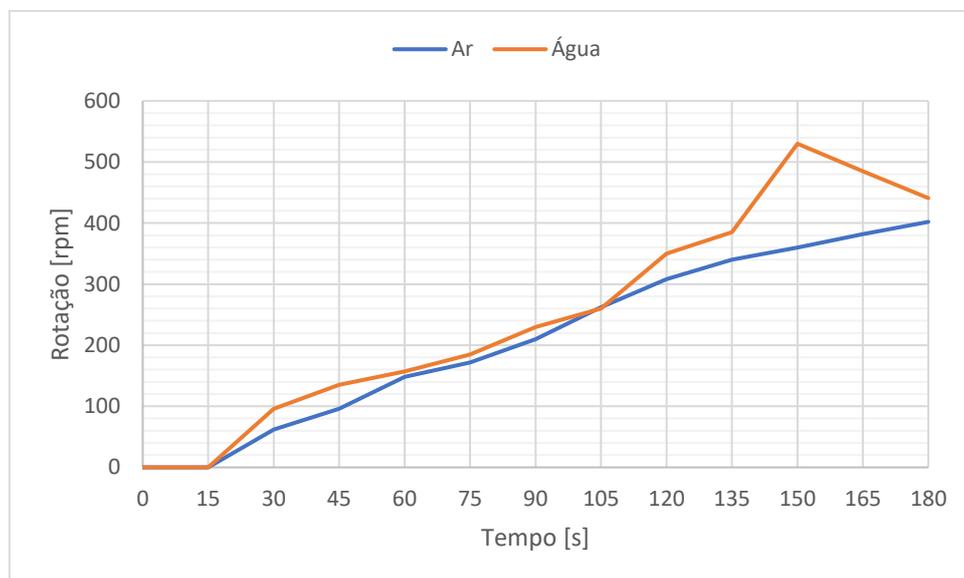


Gráfico 6: Comparação da rotação do motor.

CAPÍTULO VI

6. AVALIAÇÃO ECONÓMICA E AMBIENTAL

6.1. CUSTOS DO PROJECTO

O orçamento necessário para a execução do projecto actual, é mostrado resumidamente na tabela 3.

Tabela 3: Custo na execução do projecto.

Material / item	Preço unitário [MT]	Quantidade	Preço total [MT]
<i>Lata de alumínio</i>	-	3,0	-
<i>Lata de cola National</i>	-	2,0	-
<i>Palha de aço</i>	10,00	1,0	10,00
<i>Cotovelo plástico 3/4"</i>	30,00	1,0	30,00
<i>Bucha de junção</i>	7,00	1,0	7,00
<i>Raio de bicicleta</i>	3,00	2,0	6,00
<i>Conector de fio</i>	7,50	7,0	52,50
<i>Tampa de garrafa PET Ø50 mm</i>	-	2,0	-
<i>Tampa plástica de refrigerante Ø30 mm</i>	-	2,0	-
<i>Tampa de spray Ø65 mm</i>	-	1,0	-
<i>Disco CD</i>	-	4,0	-
<i>Suporte de disco CD</i>	-	1,0	-
<i>Balão</i>	10,00	1,0	10,00
<i>Câmara de roda de bicicleta</i>	-	1,0	-
<i>Silicone térmico Big Boss</i>	150,00	1,0	150,00
Total	-	-	265,50

Fonte: O autor

A maior parte dos itens encontrada é reciclada e pode ser facilmente encontrada no nosso dia a dia, e os restantes podem ser adquiridos em ferragens.

6.2. IMPACTO AMBIENTAL

Os motores Stirling são máquinas térmicas de combustão externa o que permite a utilização de fontes de calor renováveis como gases, biomassa, energia solar, entre outras fontes. Nesse contexto, a maior vantagem que os motores Stirling apresentam em relação aos motores de ciclos Otto e Diesel é a sua capacidade de funcionar sem necessidade exclusiva de uma queima de combustível de fontes fósseis, podendo aproveitar fontes renováveis para seu o funcionamento.

Dado poder basear-se em fontes renováveis, tal é o caso de briquetes de biomassa usados no presente estudo, o impacto ambiental da utilização desse motor é negligível em comparação com os motores de combustão interna. Dependendo da arquitectura (tipo de motor), forma e qualidade de construção e ainda do tamanho, o motor Stirling pode ter uma emissão de poluentes nula para gerar uma potência satisfatória (VIDAL, et al., 2014).

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. CONCLUSÕES

A construção e teste do funcionamento de um motor Stirling laboratorial foi o principal objectivo deste trabalho. O motor Stirling foi construído utilizando material de fácil acesso e relativamente barato como latas de refrigerante ou de cerveja. Optou-se pelo protótipo de um motor Stirling tipo gama devido à sua facilidade de construção e percepção do seu funcionamento.

Durante a construção do protótipo, foi possível perceber a importância da vedação das câmaras para um bom funcionamento do protótipo. As análises e testes feitos no protótipo, mostraram que a diferença de temperatura entre as câmaras quente e fria tem grande influência no funcionamento do motor. No entanto, a temperaturas muito altas verificou-se queda de rendimento devido à pouca eficiência dos sistemas de refrigeração do motor.

Todos os objectivos propostos no início do trabalho foram alcançados.

7.2. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para projectos futuros:

- A utilização de materiais que permitam o funcionamento do motor a temperaturas mais elevadas;
- A utilização de fluidos de trabalho diferentes do ar;
- A aplicação de um sistema de refrigeração usando água e que permita a sua renovação constante; e
- A utilização de energia solar através de concentrador parabólico como fonte de calor;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTÃO, Miriam. 2010.** Motor de Stirling. *Sites.Google.com*. [Online] Tripulantes do submarino AIP, 2010. [Citação: 28 de Maio de 2022.] <https://sites.google.com/site/motordestirling/motor-de-stirling/aplicacoes>.
- ÇENGEL, Yunus A. e BOLES, Michael A. 2013.** *Termodinâmica. 7a.* Porto Alegre : AMGH Editora Ltda, 2013.
- CONNOR, Nick. 2019.** Thermal Engineering/Trocadores de calor. *Thermal Engineering*. [Online] 03 de Novembro de 2019. [Citação: 05 de Março de 2022.] <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-um-trocador-de-calor-regenerativo-definicao/>.
- CPI - ENG: engineering. 2016.** CPI - ENG engineering: Stirling Engine. *CPI - ENG engineering*. [Online] 21 de Março de 2016. [Citação: 18 de Maio de 2022.] <https://www.cpi-eng.it/2016/03/21/stirling-engine/>.
- CRUZ, Vinícius Guimarães da. 2012.** *Desenvolvimento Experimental de um Motor Stirling tipo GAma.* Paraíba : Universidade Federal da Paraíba, 2012.
- DIAS, Laura V. R. 2016.** *Modelagem e Análise Experimental de um Protótipo de Motor Stirling.* Goiânia : Universidade Federal de Goiás, 2016.
- FURTADO, Gilberson N. e NOVENTA, Mikael M. 2014.** *Projecto de um Motor Stirling Didático e Análise de Resultados.* Vitória : Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- HELERBROCK, Rafael. s.d..** Mundo Educação/Motor Stirling. *Mundo Educação*. [Online] s.d. [Citação: 21 de Fevereiro de 2022.] <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/motor-stirling.htm>.
- HOLTZ, Robert E. e UHERKA, Kenneth L. 1988.** *A Study of the Reliability of Stirling Engines for Distributed Receiver Systems.* Argonne : Argonne National Laboratory, 1988.
- MACMAHON, Mary. 2022.** What is a working fluid. *About Mechanics*. [Online] 03 de Junho de 2022. [Citação: 24 de Junho de 2022.] <https://www.aboutmechanics.com/what-is-a-working-fluid.htm>.

MELO, Diandra C. X. S., MAIA, Felipe P. e TAPIA, Gabriel I. M. 2018. *Motor Stirling como Ferramenta de Auxílio no Aprendizado da Termodinâmica*. Campus Universitário, Lagoa Nova : Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.

MUÑUZ, Lizbeth. 2010. *Energía Solar Térmica. Disco Stirling. Energía e Impacto Ambiental*. [Online] Facultad de Ingeniería, 04 de Março de 2010. [Citação: 28 de Maio de 2022.] <https://energiaunam.wordpress.com/2010/03/04/energia-solar-termica-disco-stirling/>.

PAUTZ, Edson Ronaldo. 2013. *Estudo e projecto de um motor Stirling*. Campus Panambi : Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013.

PEREIRA, Filipa. 1999. Google Sites. *Classificação dos motores Stirling*. [Online] 1999. [Citação: 07 de Março de 2022.] <https://sites.google.com/site/motordestirling/motor-de-stirling/classificacao-dos-motores>.

PLANAS, Oriol. 2018. *Aplicações do motor Stirling. DeMotor*. [Online] 7 de Maio de 2018. [Citação: 27 de Julho de 2022.] <https://pt.demotor.net/motor-stirling/aplicativos>.

TORAL, Raul. 2015. *Stirling Engine*. 20 de Outubro de 2015, p. 18.

VIDAL, Felipe e LIMA, Manoel. 2014. *Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling em Veículos Híbridos*. Santo André : Centro Paula Souza: Faculdade de Tecnologia, 2014.

OUTRA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

WAGNER, Leandro. 2013. *Manual do Motor Stirling/ Lista dos materiais para a construção do motor*. 28 de Maio de 2013. [Citação: 7 de Maio de 2022.] <http://manualdomotorstirling.blogspot.com/2013/05/lista-dos-materiais-para-construcao-do.html>

ANEXO 1: MATERIAIS AUXILIARES PARA A CONSTRUÇÃO DO MOTOR

Tabela 4: Lista de materiais auxiliares para a construção do motor.

Código	Material
01	Lixa Dexter <i>gr</i> 100
02	Berbequim
03	Broca de $\varnothing 2\text{ mm}$
04	Broca de $\varnothing 3\text{ mm}$
05	Alicate universal
06	Folha de serra
07	Chave de fenda
08	Estilete trapezoidal
09	Caneta de feltro
10	Régua plástica flexível com escala

Fonte: O autor

ANEXO 2: TERMO DE ATRIBUIÇÃO DE TEMA DO TL



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Visto: 13.06.2022
Autorizo

TERMO DE ATRIBUIÇÃO DE TEMA DE TRABALHO DE LICENCIATURA

REFERÊNCIA DO TEMA:		Data:	
---------------------	--	-------	--

1. TÍTULO DO TEMA

Construção e teste de um motor Stirling laboratorial

2. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO TRABALHO A DESENVOLVER

O objectivo do trabalho é o desenvolvimento experimental de um protótipo de um Motor Stirling laboratorial.

O trabalho terá duas partes principais: a primeira é a construção de um motor Stirling segundo a configuração escolhida (entre alfa, beta ou gama), e a segunda consiste na realização de alguns testes no protótipo de motor construído e a apresentação do relatório final.

Sendo o motor de uso laboratorial, será utilizado para a sua construção material fácil de ser encontrado e relativamente barato.

3. LOCAL DE REALIZAÇÃO

UEM - Faculdade de Engenharia

4. SUPERVISORES

	Nome	Assinatura
Da UEM	Prof. Dr. Eng ^o Geraldo Nhumai	

5. DATAS CHAVE

Entrega do tema	04 de Março de 2022	Previsão da conclusão	
-----------------	---------------------	-----------------------	--

Maputo, 04 de Março de 2022

Chefe da Comissão Científica

Visto do Chefe do Departamento

Declaro que recebi o tema do Trabalho de Licenciatura na data acima indicada

Nome: Nilton Gabriel Madade

Assinatura: Nilton G. Madade

M. M. M.
7.6.22