

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UM MOTOR STIRLING DIDÁTICO E ANÁLISE DE
RESULTADOS**

**GILBERSON NEVES FURTADO
MIKAEL MARTINS NOVENTA**

**VITÓRIA
MARÇO, 2014**

**GILBERSON NEVES FURTADO
MIKAEL MARTINS NOVENTA**

**PROJETO DE UM MOTOR STIRLING DIDÁTICO E ANÁLISE DE
RESULTADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo, como
requisito parcial para obtenção de grau de
Engenheiro Mecânico.
Orientador: Prof. Elias Antônio Dalvi.

**VITÓRIA
MARÇO, 2014**

GILBERSON NEVES FURTADO
MIKAEL MARTINS NOVENTA

PROJETO DE UM MOTOR STIRLING DIDÁTICO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro Mecânico.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Elias Antônio Dalvi
Orientador

Prof. Juan Sérgio Romero Saenz
Examinador

Prof. Rogério Silveira de Queiroz
Examinador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus.

A Jane e Gilberson, meus pais, pelo amor e incansável esforço para que esse sonho se tornasse realidade.

A Brisa, minha irmã, por sempre estar ao meu lado.

A Gabrielly, minha namorada, por me fazer mais feliz a cada dia.

Aos meus amigos, por proporcionar os melhores anos da minha vida.

RESUMO

Com a grande demanda energética nos dias de hoje vemos a necessidade de fontes de geração de energia que tenham alta eficiência e gerem pouca poluição, e que ainda sejam flexíveis quanto ao combustível utilizado.

O motor Stirling é um mecanismo de transformação de energia térmica em mecânica bem versátil quanto a combustível, pois ele é um motor de combustão externa e precisa apenas de uma fonte de calor, que pode ser uma combustão, energia solar concentrada ou fluido quente de algum processo. Do ponto de vista ambiental ele é bem aceito devido as suas próprias características de funcionamento.

O presente trabalho apresenta o projeto de um Motor Stirling tipo Alfa e a análise e comparação de dois testes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motor feito por Robert Stirling	15
Figura 2: Ciclo ideal e real de um motor Stirling.....	17
Figura 3: Tipos de motor Stirling: (a) Alfa, (b) Beta, (c) Gama.	17
Figura 4: Motor Stirling tipo Alfa	18
Figura 5: Compressão em motor Stirling tipo Alfa.	19
Figura 6: Aquecimento em motor Stirling tipo Alfa	19
Figura 7: Expansão em motor Stirling tipo Alfa.	20
Figura 8: Rejeição de calor em motor Stirling tipo Alfa.....	20
Figura 9: Motor Stirling tipo Beta.	21
Figura 10: Compressão em motor Stirling tipo Beta.....	22
Figura 11: Aquecimento em motor Stirling tipo Beta.	22
Figura 12: Expansão em motor Stirling tipo Beta	23
Figura 13: Rejeição de calor em motor Stirling tipo Beta.	23
Figura 14: Motor Stirling tipo Gama.....	24
Figura 15: Compressão em motor Stirling tipo Gama.	25
Figura 16: Aquecimento em motor Stirling tipo Gama.....	25
Figura 17: Expansão em motor Stirling tipo Gama.	26
Figura 18: Rejeição de calor em motor Stirling tipo Gama.	26
Figura 19 - Motor Stirling Tipo Alfa.	32
Figura 20: Desenho esquemático do motor	39
Figura 21: Vista explodida do motor.....	40
Figura 22: Seringa utilizada como câmara de expansão e compressão	40
Figura 23: Ajuste entre êmbolo e cilindro	41
Figura 24: Suporte de fixação das câmaras.	41
Figura 25: Bucha de fixação das câmaras.	41
Figura 26: Conjunto suporte, bucha e cilindro	43
Figura 27: Virabrequim e volante	44
Figura 28: Curso das câmaras	44
Figura 29: Representação do ângulo de fase ϕ	44
Figura 30: Protótipo construído	47
Figura 31: Base não utilizada.	54

Figura 32: Regenerador	55
Figura 33: Representação da bucha de bronze.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Transferência de calor relativa para vários gases	28
Tabela 2: Performance relativa de fluidos de trabalho selecionados	28
Tabela 3: Incógnitas utilizadas na teoria de Shmidt.	31
Tabela 4: Valores definidos com projeto	45
Tabela 5: Orçamento dos materiais necessário para a construção do motor	45
Tabela 6: Resultado do teste 1.....	48
Tabela 7: Resultado do teste 2.....	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Diagrama PV do teste 1.....	49
Gráfico 2: Curva RPM x Tempo do teste 1.....	50
Gráfico 3: Diagrama PV do teste 2.....	51
Gráfico 4: Diagrama RPM x Tempo do teste 2.....	52
Gráfico 5: Comparação entre os Teste 1 e 2. RPM x segundos.	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
2. MOTOR STIRLING	14
2.1 HISTÓRICO	14
2.2 TIPOS DE MOTORES.....	16
2.2.1 Motor Stirling tipo Alfa.....	18
2.2.2 Motor Stirling Tipo Beta.....	20
2.2.3 Motor Stirling tipo Gama.....	24
2.3 FLUIDOS DE TRABALHO.....	27
3. TEOREMA DE SHMIDT	30
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	30
3.2 MODELO ALFA.....	32
4. PROJETO DO MOTOR.....	39
4.1 DESCRIÇÃO GERAL.....	39
4.2 CÂMARA E PISTÃO DE EXPANSÃO	40
4.3 CÂMARA E PISTÃO DE COMPRESSÃO E VOLUME MORTO	42
4.4 VIRABREQUIM E VOLANTE	43
4.5 CUSTOS	45
5. SÍNTESE DOS TESTES REALIZADOS	47
5.1 TESTE 1.....	48
5.2 TESTE 2.....	50
5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	52
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	54
6.1.1 Fixação dos cilindros de expansão e compressão	54
6.1.2 Vedação.....	54

6.1.3 Atrito entre êmbolo e cilindro	55
6.1.4 Resistência à temperatura do cilindro de expansão	55
6.2 CONCLUSÃO.....	56
6.3 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	57
7. BIBLIOGRAFIA	58

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O mundo está cada vez mais dependente de suas fontes energéticas, atualmente o ser humano procura maior comodidade e otimização de mão de obra e para isso vem substituindo suas tarefas de rotina por máquinas que realizam o trabalho com mais rapidez e precisão. Essa “nova ideia” já esta enraizada em grandes indústrias, onde operários estão sendo substituídos por equipamentos e em nossos lares aparelhos eletrônicos são mais frequentes, para uma maior comodidade. Essa tendência vem aumentando, e conseqüentemente a demanda de energia também, porém hoje não basta produzir energia, precisamos de fontes sustentáveis que produzam energia limpa, segura e com baixo custo para ser viável.

O motor Stirling se encaixa perfeitamente nesse quesito de produzir energia de forma sustentável e com baixo custo, com sua alta versatilidade de escala é possível produzir pequenas quantidades de energia com alta eficiência.

Seguindo essa linha de raciocínio, este trabalho foca nos fatores que influenciam o funcionamento do motor Stirling, para a identificação de quais são as maiores dificuldades encontradas na fabricação e na produção de um motor com alto rendimento.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante da grande demanda energética que vem ocorrendo, procuram-se fontes de energia sustentáveis e versáteis. O motor Stirling foi utilizado no início do século passado para a produção de energia e deixado de lado por causa de algumas características, como, baixo torque, dificuldade de trabalho em diferentes rotações, alta vedação do pistão com o cilindro e altas temperaturas de trabalho. Porém seu princípio de funcionamento pode ter grande valor, pois seus combustíveis podem ser de fácil aquisição e sustentáveis.

Visto a importância da concepção de novas fontes energéticas, esse tipo de motor pode ser de grande utilidade para a sociedade e estudos aprofundados nessa área tem chance de representar um satisfatório desenvolvimento de novas tecnologias.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo o projeto e análise de um motor Stirling tipo Alfa para fins acadêmicos.

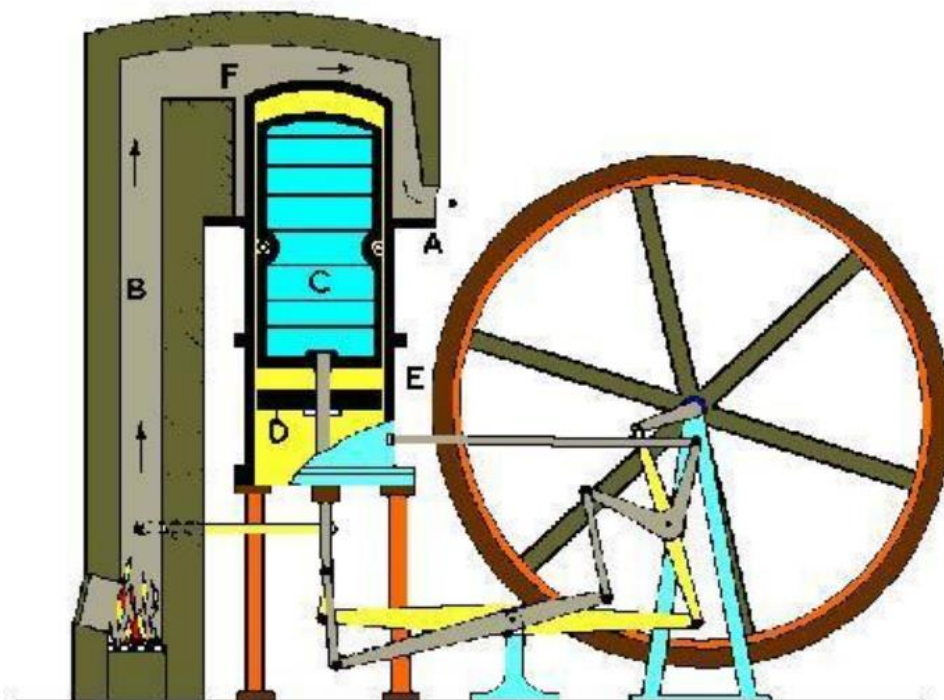
2. MOTOR STIRLING

2.1 HISTÓRICO

Em 1816, o engenheiro escocês Robert Stirling (1790 –1878) criou um modelo de um motor que utilizava um determinado volume de um gás qualquer, que aquecido externamente, era forçado a entrar numa câmara de volume maior que o inicial, onde o gás podia expandir-se livremente. Ele chamava o motor de “motor de ar” porque as máquinas a vapor de sua época podiam frequentemente explodir, matando ou mutilando pessoas que, por azar, estivessem nas proximidades. Os motores Stirling não poderiam explodir, e produziam mais potência do que as máquinas a vapor então em uso (FERNANDES, 2010)

A patente original nº 4081 de 1816 tinha o obscuro título: “Improvements for Diminishing the Consumption of Fuel, and in Particular an Engine Capable of Being Applied to the Moving (of) Machinery on a Principle Entirely New – Melhora para Redução do Consumo de Combustível, e em Particular um Motor Capaz de ser Aplicado ao Movimento de Máquina com um Princípio Completamente Novo”. Nesta patente, Robert Stirling não apenas descrevia a construção e o uso do regenerador pela primeira vez na história, como também prevê as suas principais aplicações, como para fornos de vidros ou para fusão de metais. Também está incluída uma descrição do primeiro motor de ciclo fechado, como o apresentado na Figura 1 (BARROS, 2005).

Figura 1: Motor feito por Robert Stirling



Fonte: Cruz, 2012.

Neste motor, calor é gerado pela queima de um combustível em uma fornalha, os gases da combustão passavam por B, F e saíam em uma chaminé em A (Figura 1). Em F, está posicionada a parte quente do motor Stirling. O pistão de deslocamento C, é o responsável por deslocar o fluido de trabalho do espaço de expansão para o de compressão. O pistão D é o de trabalho. Com o aquecimento do fluido de trabalho na parte quente do motor (espaço de expansão) e resfriamento na parte fria (espaço de compressão), e com um mecanismo para sincronizar o movimento destes pistões, havia o funcionamento do motor (BARROS, 2005).

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. Depois disso, vários motores Stirling foram feitos com maiores potências e eficiências. Entretanto, a capacidade dos motores Stirling produzidos neste período era inferior comparado aos motores Otto e Diesel. O motor Otto foi inventado em 1877 e o motor diesel em 1893 (BARROS, 2005).

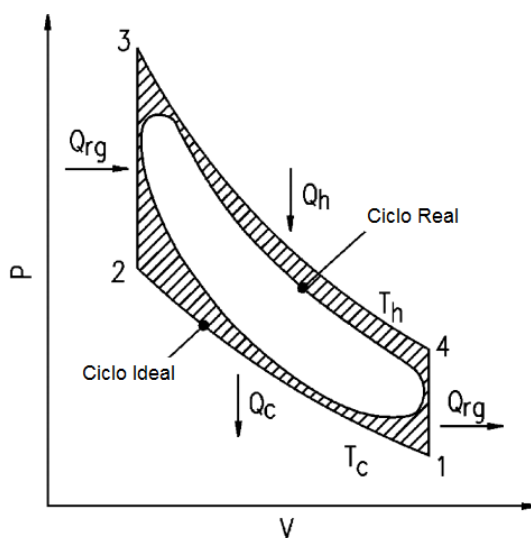
Em 1873, o motor stirling foi usado para refrigeração e/ou aquecimento, absorvendo calor no estágio de compressão e liberando trabalho ou mais calor na fase de expansão. Nesta época foram criados alguns protótipos com base no ciclo Stirling (FERNANDES, 2010).

Mas o projeto Stirling foi efetivamente usado em refrigeração, no séc. 20. Em breve espera-se que os motores de combustão interna que trabalham com a queima de alguns derivados de petróleo na forma líquida entrem em desuso, devido à viabilização do ciclo Stirling e outros ciclos (FERNANDES, 2010).

Em 1970 e 1980 várias pesquisas foram realizadas sobre utilização de motores Stirling em automóveis por empresas como General Motors e Ford. A principal desvantagem é a tendência que o motor Stirling tem de trabalhar com potência constante e isto não é ideal para automóveis. Mas esta característica é perfeita para aplicações tais como bombeamento de água. Estudos sobre os motores de alta temperatura foram amplamente relatados. Na maioria dos modelos, os motores operam com temperaturas de aquecimento e resfriamento em torno de 923K a 338K respectivamente. O limite térmico de operação dos motores de alta temperatura depende do material usado na sua construção. A eficiência desses motores é entre 30 e 40% numa faixa de temperatura típica de 923-1073K e velocidade de operação entre 2000 a 4000 rpm (CRUZ, 2012).

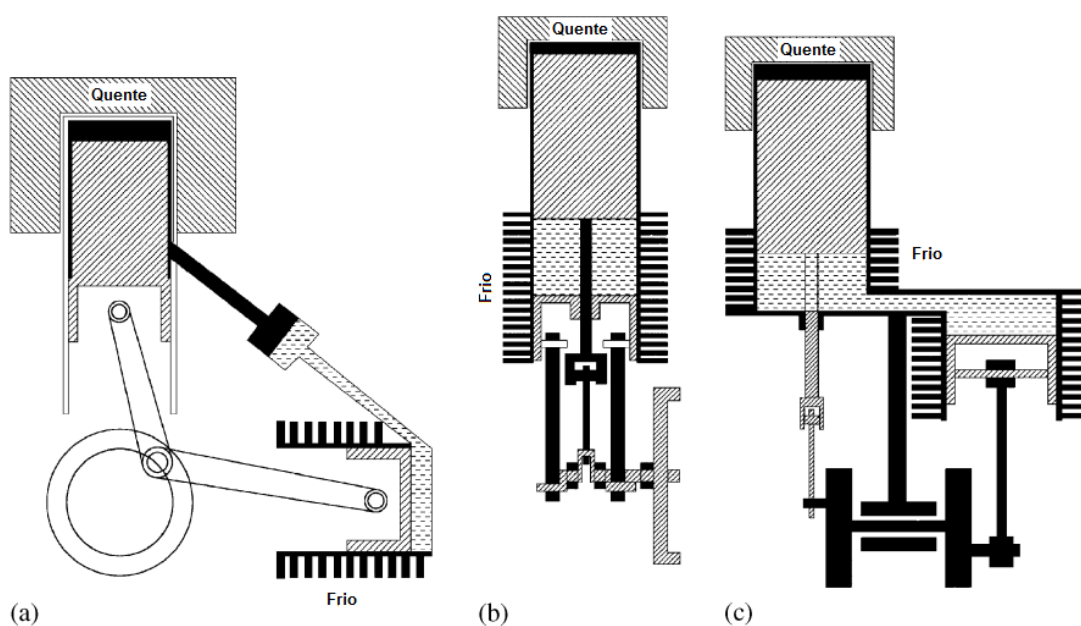
2.2 TIPOS DE MOTORES

Os motores Stirling podem ser classificadas em três tipos: Alfa, Beta e Gama. O motor tipo alfa consiste em dois cilindros independentes com ângulo de fase geralmente de 90°, com dois pistões. Um desses cilindros é aquecido e o outro é resfriado utilizando um sistema com ar ou água. A Figura 2 mostra o ciclo ideal e o ciclo real em um diagrama PV.

Figura 2: Ciclo ideal e real de um motor Stirling

Fonte: Corria, 2006.

Segundo Corria (2006), o tipo Beta é baseado no motor original feito por Robert Stirling. Consiste em um cilindro com zona quente e fria. Possui um deslocador dentro do cilindro. O motor tipo Gama é derivado do tipo Beta, porém de construção simplificada. Ele consiste em dois cilindros separados. O deslocador é inserido em um dos cilindros e o cilindro de potência no outro. A Figura 3 mostra cada um dos tipos de motor.

Figura 3: Tipos de motor Stirling: (a) Alfa, (b) Beta, (c) Gama.

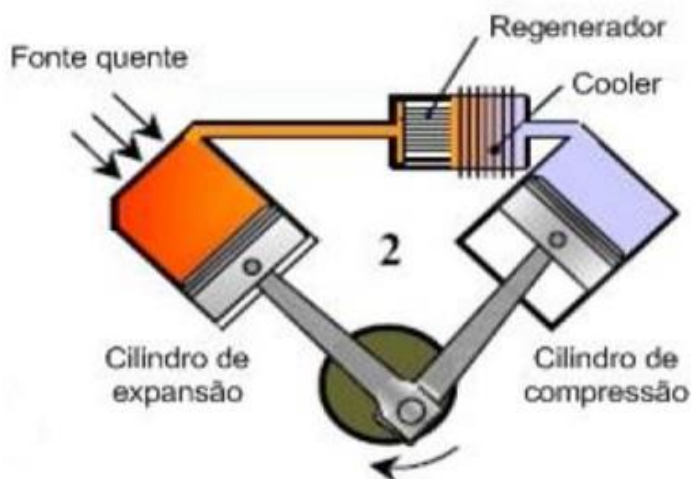
Fonte: Corria, 2006.

A seguir temos uma explicação do princípio de funcionamento teórico dos diferentes tipos de motores Stirling, todos com o mesmo ciclo termodinâmico, diferenciando-se apenas por formas de montagem.

2.2.1 Motor Stirling tipo Alfa

Essa configuração possui dois pistões separados por um regenerador, nessa configuração é necessário que a defasagem dos pistões seja de 90° , para isso pode-se colocar os cilindros paralelos e acoplar a biela de cada pistão defasada ou colocar a biela na mesma posição no virabrequim e posicionar os cilindros com a 90° um em relação a outro, como na Figura 4. Embora possua a configuração mais simples, o motor Alfa apresenta a desvantagem de ambos os pistões necessitarem de vedação por conter gás de trabalho.

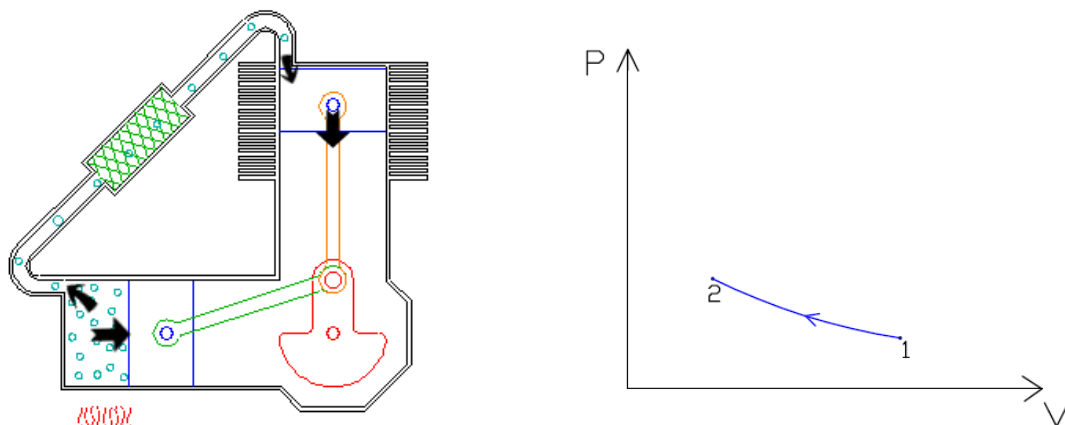
Figura 4: Motor Stirling tipo Alfa



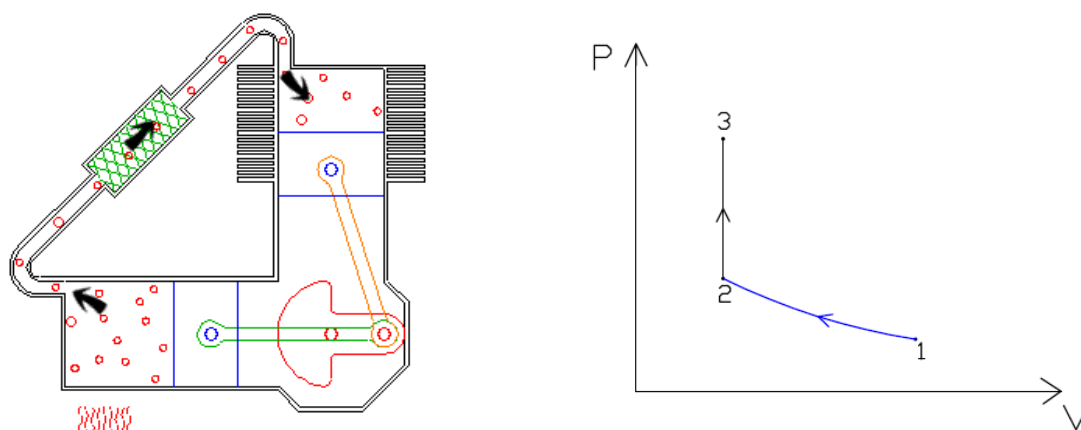
Fonte: Cruz, 2012.

O ciclo Alfa é ilustrado e explicado com as Figuras de 5 a 8.

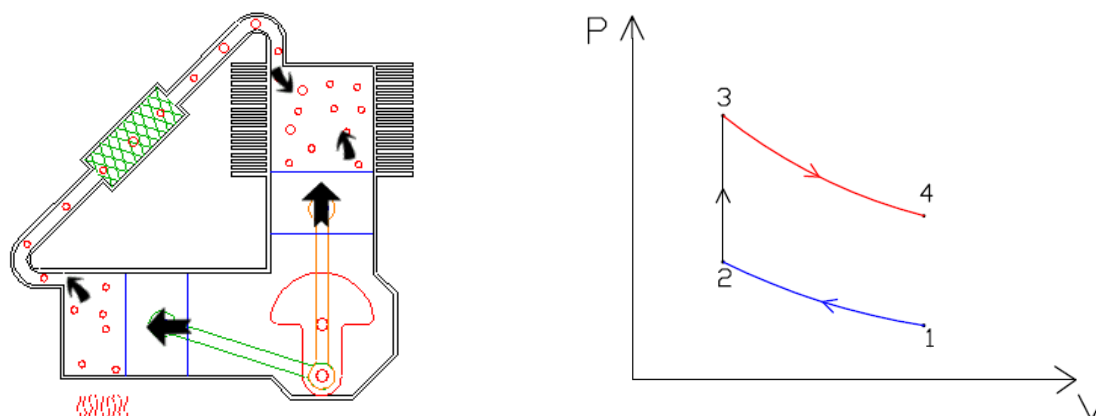
1-2. Compressão Isotérmica: Neste processo, ambos os pistões se movem para cima realizando trabalho de compressão sobre o gás, enquanto calor é rejeitado pelo sistema de resfriamento;

Figura 5: Compressão em motor Stirling tipo Alfa.**Fonte:** Pereira, 2013

2-3. Aquecimento a volume constante: O pistão de compressão vai até o ponto morto superior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para baixo. Com isso o gás de trabalho passa para o espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa e aumentando a pressão;

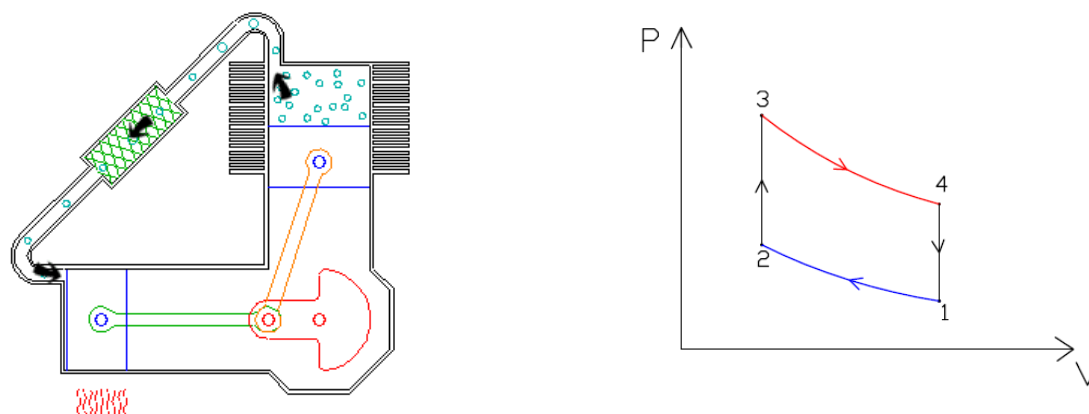
Figura 6: Aquecimento em motor Stirling tipo Alfa**Fonte:** Pereira, 2012.

3-4. Expansão Isotérmica : Neste processo, ambos os pistões se movem para baixo, expandindo o gás e realizando trabalho. Este processo é realizado a temperatura constante, pois durante a expansão o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;

Figura 7: Expansão em motor Stirling tipo Alfa.

Fonte: Pereira, 2012.

4-1.Rejeição de calor a volume constante: o pistão de compressão se movimenta até o ponto morto inferior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para cima. Com isso, o gás de trabalho passa para o espaço de compressão, tendo calor rejeitado pelo sistema de resfriamento, reduzindo a sua pressão até a condição 1.

Figura 8: Rejeição de calor em motor Stirling tipo Alfa

Fonte: Pereira, 2012.

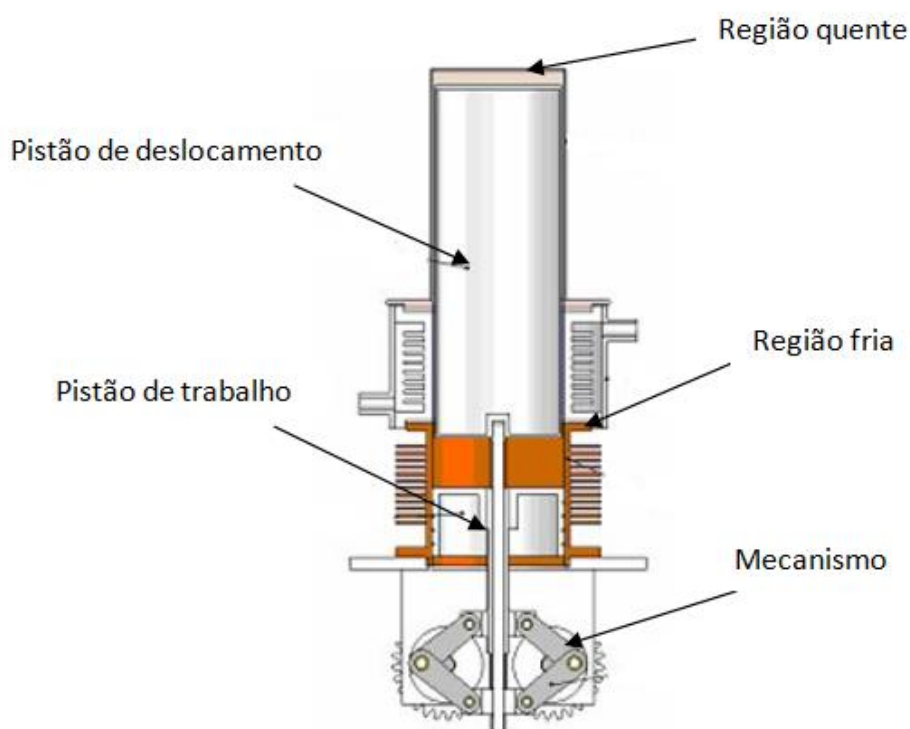
2.2.2 Motor Stirling Tipo Beta

Com o pistão de deslocamento e o de trabalho alinhados em um único cilindro, é denominado de configuração Beta. Por ter uma sobreposição dos pistões, uma maior taxa de compressão é alcançada e consequentemente maior potencia é obtida nessa configuração se comparada com as outras. Porém, as hastes do pistão

de deslocamento e do pistão de trabalho estão alinhadas, o que torna o mecanismo complexo. No interior do cilindro está o regenerador. Os motores pequenos não costumam conter regenerador, e existe uma folga de alguns décimos de milímetro entre o pistão de deslocamento e o cilindro para permitir a passagem do gás de trabalho (PAUTZ, 2013).

O ciclo Beta é ilustrado e explicado com as Figuras de 10 a 13.

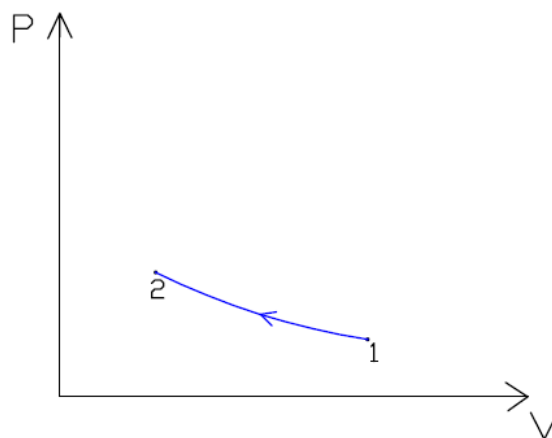
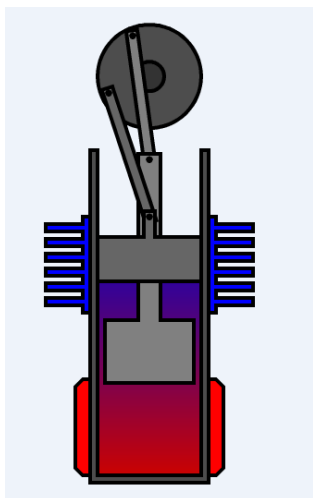
Figura 9: Motor Stirling tipo Beta.



Fonte: Mírez, 2013.

1-2. O pistão de trabalho é movimentado para a esquerda e o gás é comprimido. O gás é resfriado, com objetivo de realizar a compressão a temperatura constante;

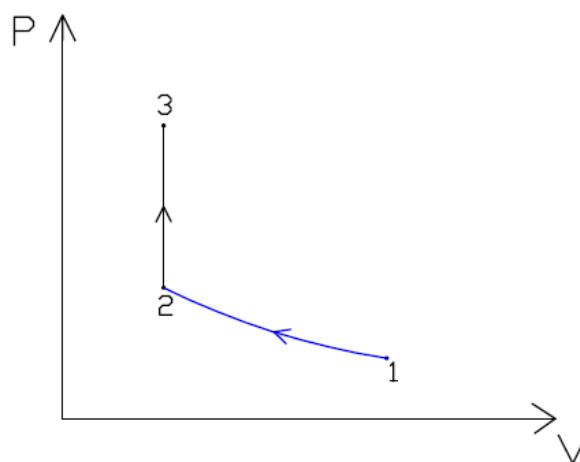
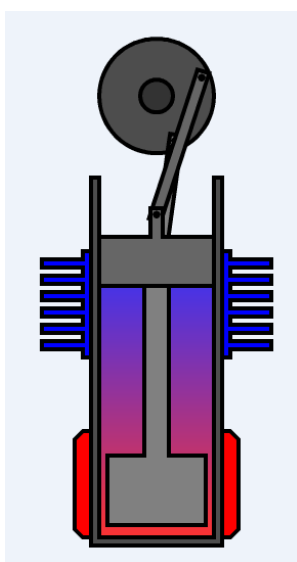
Figura 10: Compressão em motor Stirling tipo Beta..



Fonte: Pereira, 2013.

2-3. O pistão de deslocamento é movimentado para a direita, forçando o gás a passar através do canal de conexão para o volume quente, onde o gás é aquecido e sua pressão aumenta. Porém é importante notar que o volume nesse processo é constante;

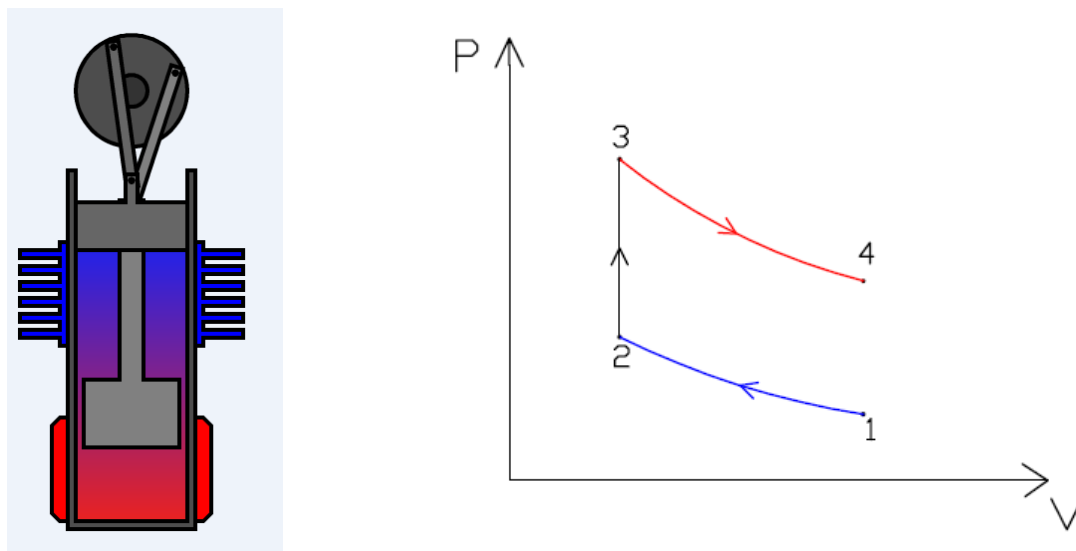
Figura 11: Aquecimento em motor Stirling tipo Beta.



Fonte: Pereira, 2013.

3-4. Ambos os pistões movimentam-se para a direita, devido a expansão do gás. O gás é aquecido pela fonte quente com o objetivo de se obter uma expansão a temperatura constante;

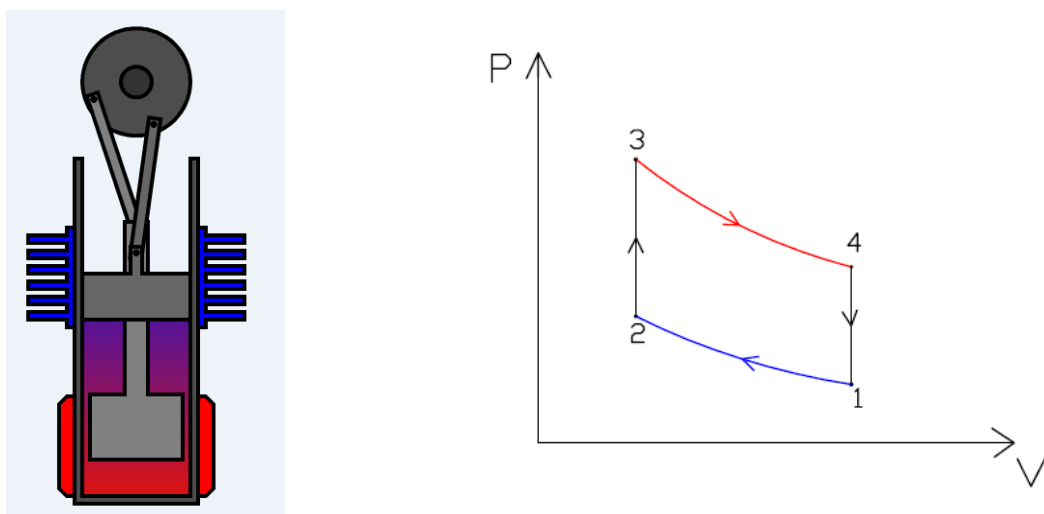
Figura 12: Expansão em motor Stirling tipo Beta



Fonte: Pereira, 2013.

4-1. O pistão de deslocamento é movimentado para a esquerda, forçando o gás a passar pelo canal de conexão para o volume frio, onde o gás é resfriado pela água de resfriamento. Quando o gás é resfriado, sua pressão reduz até a pressão inicial. É importante notar que o volume neste processo é constante;

Figura 13: Rejeição de calor em motor Stirling tipo Beta.

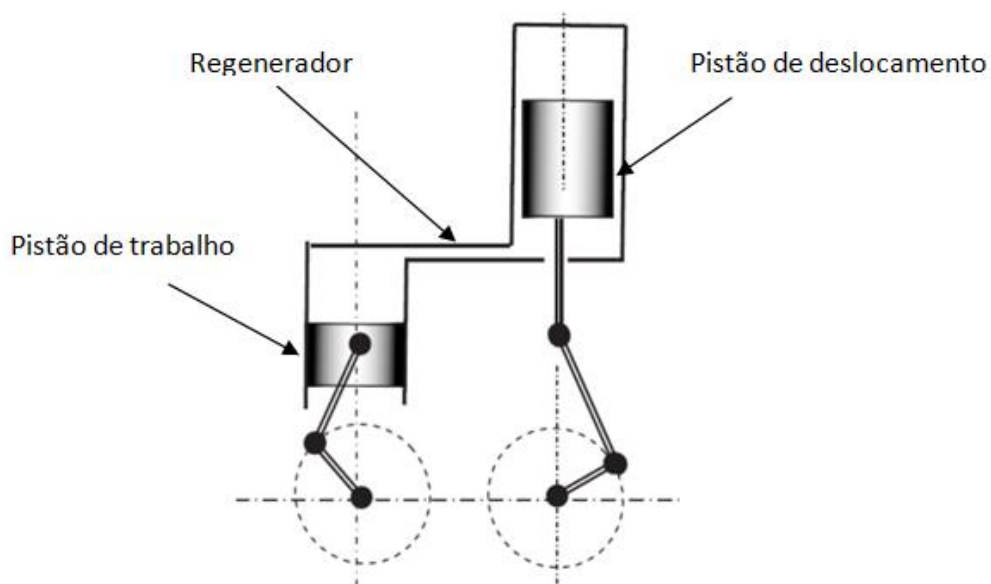


Fonte: Pereira, 2013.

2.2.3 Motor Stirling tipo Gama

O motor Gama tem um deslocador similar ao do motor Beta, porém este é montado em outro cilindro, e é visto na Figura 14. Essa configuração tem o conveniente de separar a parte quente do trocador de calor, que é associada ao pistão de deslocamento, do espaço de compressão, associado ao pistão de trabalho (PAUTZ, 2013)

Figura 14: Motor Stirling tipo Gama



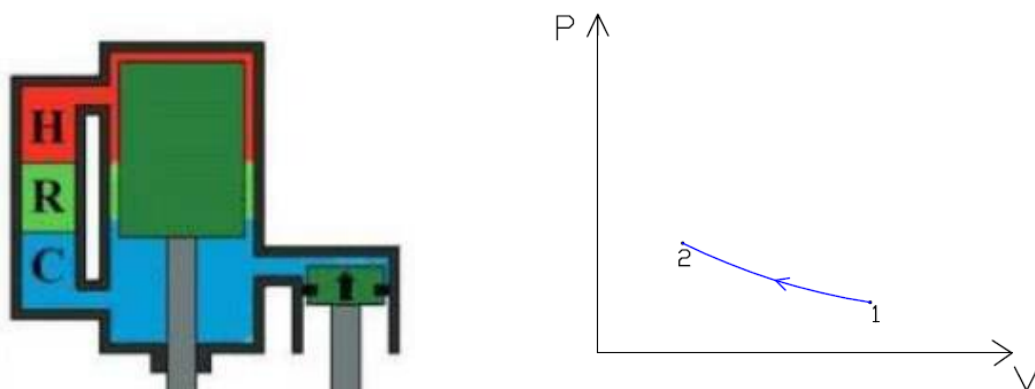
Fonte: Cruz, 2012.

Comparando o motor tipo Gama com o motor tipo Beta, o seu mecanismo é mais simples, e ajustes na taxa de compressão e incremento da área de transferência de calor são relativamente fáceis de obter, apresenta, entretanto, volumes mortos maiores, além do fato de parte do processo de expansão ocorrer no espaço de compressão, causando redução na potência de saída (PAUTZ, 2013).

O ciclo Gama é ilustrado e explicado com as Figuras de 15 a 18.

1-2. Compressão Isotérmica: O pistão de trabalho é movimentado para cima, realizando trabalho de compressão sobre o fluido de trabalho, enquanto rejeita-se calor para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante;

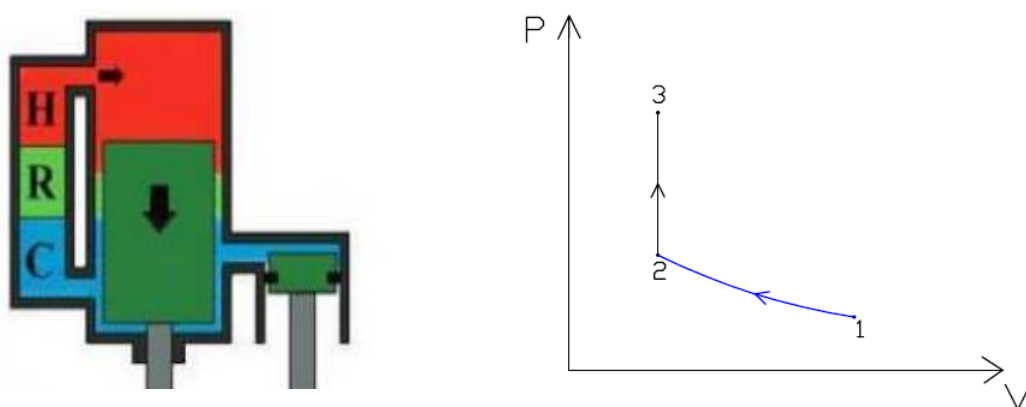
Figura 15: Compressão em motor Stirling tipo Gama.



Fonte: Pautz, 2013.

2-3. Aquecimento a volume constante: o pistão de deslocamento é movimentado para baixo, fazendo com que o fluido de trabalho se direcione para o espaço de expansão, recebendo calor da fonte externa e elevando a pressão;

Figura 16: Aquecimento em motor Stirling tipo Gama.

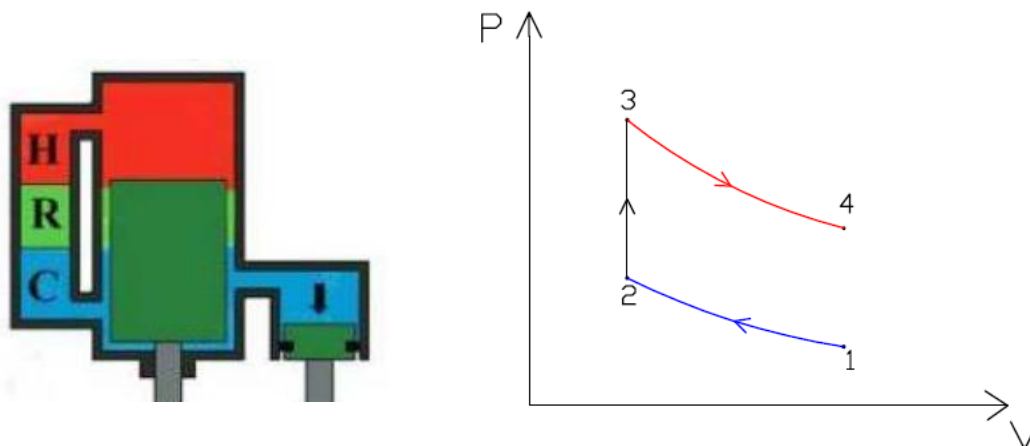


Fonte: Pautz, 2013.

3-4. Expansão Isotérmica: Com o aumento da pressão do motor, o pistão de trabalho é movimentado para baixo, realizando trabalho. Este processo é realizado a

temperatura constante, sendo que durante a expansão, o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;

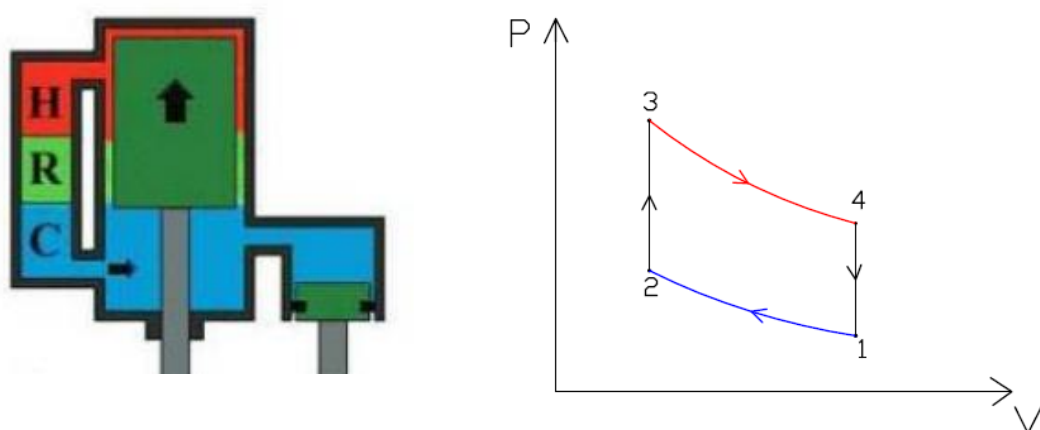
Figura 17: Expansão em motor Stirling tipo Gama.



Fonte: Pautz, 2013.

4-1. Rejeição de calor a volume constante: o pistão de deslocamento é movimentado para cima, fazendo com que o fluido de trabalho passe para o espaço de compressão, rejeitando calor para o sistema de resfriamento, reduzindo a sua pressão até a condição 1.

Figura 18: Rejeição de calor em motor Stirling tipo Gama.



Fonte: Pautz, 2013.

2.3 FLUIDOS DE TRABALHO

Fluidos de trabalho com elevada capacidade de calor específico pode ser usado para os motores de ciclo Stirling. Com algumas exceções, os motores do século 19 utilizaram ar atmosférico como fluido de trabalho, pois é barato e disponível. A maioria deles operavam perto da pressão atmosférica. O fluido de trabalho para um motor Stirling deve ter as seguintes propriedades termodinâmicas, de transferência de calor e de dinâmica dos gases:

- Elevada condutividade térmica
- Elevado calor específico
- Baixa viscosidade
- Baixa densidade

Para uma melhor performance do sistema, em adição aos pontos citados acima, disponibilidade, custo, segurança de operação e armazenamento são alguns dos fatores importantes que não podem ser negligenciados. A capacidade do fluido de trabalho em termos de calor específico, condutividade térmica e densidade é definida por Martnini (1971) e Clarke (1982) e é muito útil para seleção preliminar do fluido de trabalho.

$$Fator\ de\ capacidade = \frac{\textit{condutividade térmica}}{\textit{calor específico} \times \textit{densidade}} \quad (1)$$

Para determinar o melhor fluido de trabalho, a performance de um sistema com diferentes fluidos deve ser analisado. A investigação experimental do fluido adequado é difícil e cara. Equações empíricas feitas por Beale (1971) não existem para avaliações de fluidos de trabalho, provavelmente devido a falta de dados experimentais para formar uma correlação significativa. Uma simples aproximação sugerida por Walker baseada na análise de fluxo constante inicial é útil para a seleção do fluido. Utilizando a analogia de Reynolds, é feita uma relação entre transferência de calor e a força de atrito de uma corrente que flui através de um duto para um sistema em termos de taxa de transferência de calor e limites de temperatura. A relação é,

$$Q \propto (\rho^2 C_p^2)^{0,5} \quad (2)$$

Tabela 1: Transferência de calor relativa para vários gases

Fluido de trabalho	Transferência de calor(Q)	Fator de capacidade
Ar atmosférico	1.0	1.0
Helio	1.42	0.83
Hidrogênio	3.42	0,68
Água	1.95	0.39
Sódio-Potássio eutético	32.62	1.32

Fonte: Thombare, 2008.

Tabela 2: Performance relativa de fluidos de trabalho selecionados

Gases	Massa nominal kg/kmol)	molar (M	Constante dos gases (R kJ/kg K)	Calor específico		Taxa (C_p/C_v)
				C_p (kJ/kg K)	C_v (kJ/kg K)	
H ₂	2		4.12	14.20	10.08	1.41
He	4		2.08	5.19	3.11	1.67
Ne	20		0.415	1.03	0.62	1.66
N ₂	28		0.297	1.04	0.74	1.4
CO	28		0.297	1.04	0.75	1.4
Ar Atmosférico	29		0.287	1.01	0.72	1.4
O ₂	32		0.260	0.92	0.66	1.4
Ar	40		0.208	0.52	0.31	1.67
CO ₂	44		0.189	0.85	0.66	1.28

Fonte: Thombare, 2008.

Esta equação é requerida para simular a operação do motor com diferentes fluidos de trabalho, com a avaliação dessas equações podemos escolher o melhor fluido. Na Tabela 1 vários fluidos são comparados utilizando as Equações 1 e 2 com uma média de temperatura de 800 k e 5Mpa. Pode ser visto que nenhum fluido de trabalho satisfaz esses dois requisitos exceto NaK eutético. A viabilidade do uso desse fluido de trabalho é um atual investigação da University of California, San Diego. A maioria das propriedades físicas envolvendo variação da pressão e temperatura e assim transferência de calor Q e fator de capacidade devem ser determinadas em condições prevalentes. NaK é um fluido superior para um futuro iminente.

Uma análise de todos os possíveis gases, deixando de lado o NaK eutético, irá mostrar que hidrogênio e hélio são melhores que outros fluidos de trabalho. Hidrogênio é melhor porque tem uma alta condutividade térmica, menor viscosidade e uma baixa capacidade de calor em termos de volume. Apenas uma pequena quantidade de calor é necessária para modificar sua temperatura. Entretanto, possui uma pequena massa molar, o que o torna difícil a sua vedação. É também inflamável, mas a quantidade de gás utilizada é geralmente pequena. Além disso, alguns metais são fragilizado por hidrogênio. Por outro lado, hélio é inerte e pode ser armazenado de forma constante em metais. Possui uma capacidade de expansão térmica menor que o hidrogênio e a condutividade térmica tão boa quanto, mas a viscosidade é duas vezes maior que a do hidrogênio. Michels (1975) mostrou que o motor Stirling pode ser projetado usando tanto hidrogênio, hélio ou nitrogênio, todos com a mesma eficiência e temperatura de operação. Entretanto, o motor deverá ter um design para cada tipo de fluido de trabalho. Hélio e hidrogênio podem atender uma mesma necessidade de potência. Mas um motor projetado para operar com hidrogênio não irá operar da mesma forma com hélio. O hidrogênio possui uma maior faixa de eficiência de operação quando comparado com hélio. Um motor Stirling operando com nitrogênio ou ar está limitado entre 20 e 25% da potência fornecida por um motor com hidrogênio ou hélio com as mesmas dimensões (MICHELS, 1975).

3. TEOREMA DE SHMIDT

55 anos depois da invenção do motor Stirling, Schmidt (1871) introduziu a análise clássica desse tipo de motor. A análise foi feita para os três tipos de apresentados anteriormente, que são Alfa, Beta e Gama. Schmidt obteve a teoria fechada, que providencia uma variação senoidal do espaço de trabalho do motor. A teoria mantém os principais pressupostos de compressão isotérmica e expansão e de regeneração perfeita.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A performance do motor pode ser calculada com um diagrama P-V. O volume é facilmente analisado através da geometria interna. Quando analisamos o volume, massa do gás de trabalho e a temperatura, a pressão é calculada utilizando a equação abaixo para um gás ideal:

$$PV = mRT \quad (3)$$

Onde:

- P= pressão
- V=volume
- m= massa
- R= constante universal dos gases
- T= temperatura

Para a realização da análise devem ser feitas algumas considerações prévias, as quais são apresentadas por Sulzbach (2010).

- a. Não há perda de pressão durante as trocas de calor, também não há pressões internas diferentes.
- b. O processo de expansão e compressão acontecem isotermicamente.
- c. O gás de trabalho deve ser considerado ideal.
- d. Há um regenerador perfeito.

- e. O volume morto de expansão mantém a temperatura do gás de expansão (T_E), o volume morto de compressão mantém a temperatura de compressão do gás (T_C).
- 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 de compressão (V_C) variam de acordo com uma curva senoidal.

Na Tabela 3 temos a lista das variáveis utilizadas na teoria de Shmidt. Esses valores serão usados para explicar a teoria e cálculo do motor que será feito posteriormente.

Tabela 3: Incógnitas utilizadas na teoria de Shmidt.

Nome	Símbolo	Unidade
Pressão do motor	P	Pa
Volume percorrido pelo pistão de expansão ou de deslocamento	V_{SE}	m^3
Volume percorrido pelo pistão de compressão ou de potência	V_{SC}	m^3
Volume morto do cilindro de expansão	V_{DE}	m^3
Volume do regenerador	V_R	m^3
Volume morto do cilindro de compressão	V_{DC}	m^3
Volume momentâneo do cilindro de expansão	V_E	m^3
Volume momentâneo do cilindro de compressão	V_C	m^3
Volume momentâneo total	V	m^3
Massa total do gás de trabalho	m	kg
Constante universal dos gases	R	J/kgK
Temperatura do gás no cilindro de expansão	T_E	K
Temperatura do gás no cilindro de compressão	T_C	K
Temperatura do gás no regenerador	T_R	K
Ângulo de fase	dx	°
Temperatura relativa	t	
Volume percorrido relativo	v	
Volume morto relativo	X	

Velocidade de rotação do motor	n	Hz
Energia de expansão	W_E	J
Energia de compressão	W_C	J
Energia do motor	W_i	J
Potência de expansão	L_E	W
Potência de compressão	L_C	W
Potência do motor	L_i	W
Eficiência do motor	e	

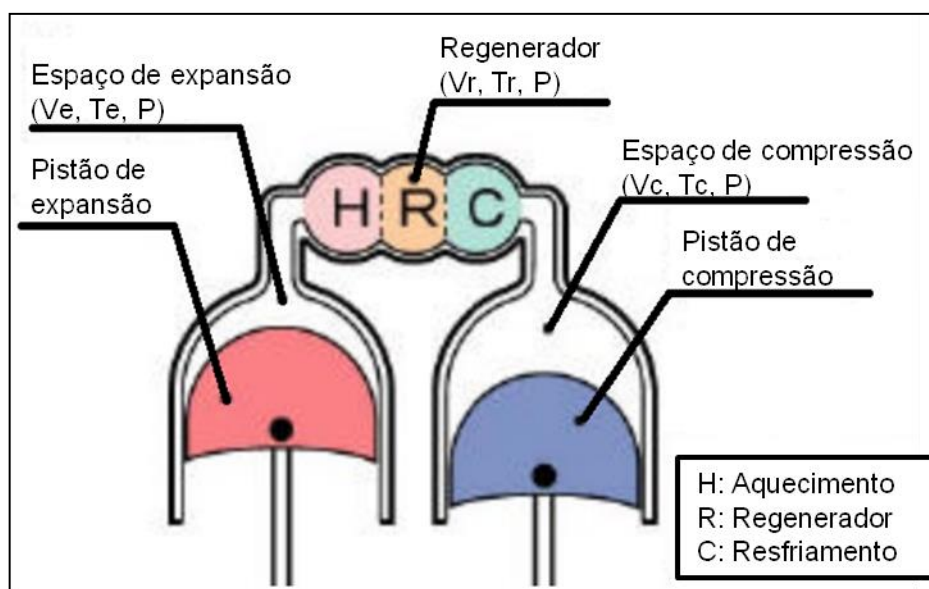
Fonte: Hirata, 1995.

A literatura apresenta métodos de cálculo para os motores tipo Alfa, Beta e Gama. Porém vamos apresentar apenas para o tipo de motor que será construído, que é do tipo Alfa.

3.2 MODELO ALFA

A figura X nos mostra um desenho esquemático de um motor Stirling tipo Alfa.

Figura 19 - Motor Stirling Tipo Alfa.



Fonte: Hirata, 1995.

O volume morto é definido como o volume total vago do motor Stirling. Em geral, o volume morto se refere a todo o volume do fluido de trabalho contido no espaço

morto do motor, incluindo regenerador e portas de transferência. O volume morto é inevitável. Em um design prático de um motor Stirling, o volume morto total deve ser de até aproximadamente 58% do volume total (Martini, 1979).

Os volumes momentâneos de expansão (V_E) e de compressão (V_C) serão calculados em função do ângulo de manivela (x). Esse ângulo é definido como " $x = 0$ " quando o pistão de expansão estiver na posição superior (ponto morto superior).

O volume momentâneo de expansão (V_E) é definido pela Equação 4 em função do volume percorrido pelo pistão de expansão (V_{SE}) e o volume morto do cilindro de expansão (V_{DE}), de acordo com o que foi assumido na condição (g).

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + V_{DE} \quad (4)$$

O volume momentâneo de compressão (V_C) é encontrado com a Equação 5 em função do volume percorrido pelo pistão de compressão (V_{SC}), do volume morto de compressão (V_{DC}) e do ângulo de fase (dx).

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} [1 - \cos(x - dx)] + V_{DC} \quad (5)$$

O volume momentâneo total é calculado com a Equação 6.

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (6)$$

Através do que foi assumido em (a), (b) e (c), 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_R e V_C) e da constante do gás (R).

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_R}{RT_R} + \frac{PV_C}{RT_C} \quad (7)$$

A temperatura relativa (t), o volume percorrido relativo (v) e os volumes mortos relativos (X) são encontrados nas seguintes equações.

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (8)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (9)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (10)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (11)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (12)$$

A temperatura do regenerador (T_R) é calculada pela Equação 13 usando a suposição (f).

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (13)$$

Quando a equação (5) é alterada usando as equações de (6) a (10), a massa total de gás contida no motor é descrita pela Equação 14.

$$m = \frac{P}{RT_C} \left(tV_E + \frac{2\tau V_R}{1+t} + V_C \right) \quad (14)$$

A Equação 14 é modificada usando as Equações 4 e 5, a massa total de gases (m) passa a ser descrita pela equação (13).

$$m = \frac{PV_{SE}}{2RT_C} \{S - B\cos(x - a)\} \quad (15)$$

Agora,

$$a = tg^{-1} \frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx} \quad (16)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (17)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv\cos dx + v^2} \quad (18)$$

A pressão (P) do motor é definida pela Equação 19, usando a Equação 15:

$$P = \frac{2mRT_C}{V_{SE}\{S - B\cos(\theta - a)\}} \quad (19)$$

A pressão média (P_{med}) é calculada a seguir:

$$P_{med} = \frac{1}{2\pi} \int P dx = \frac{2mRT_C}{V_{SE}\sqrt{S^2 - B^2}} \quad (20)$$

c é definido pela equação seguinte.

$$c = \frac{B}{S} \quad (21)$$

Como resultado, a pressão do motor (P), em função da pressão média (P_{med}), é calculada na Equação 22.

$$P = \frac{P_{med}\sqrt{S^2 - B^2}}{S - B\cos(x - a)} = \frac{P_{med}\sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (22)$$

Por outro lado, no caso da Equação 19, quando $\cos(x - a) = 1$, a pressão do motor (P) se torna mínima (P_{min}). A próxima equação é introduzida:

$$P_{min} = \frac{2mRT_C}{V_{SE}(S + B)} \quad (23)$$

Portanto, a pressão do motor (P), em função da pressão mínima (P_{min}), é descrita na equação seguinte.

$$P = \frac{P_{min}(S + B)}{S - B\cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 + c)}{1 - c.\cos(x - a)} \quad (24)$$

Similarmente, quando $\cos(x - a) = 1$, a pressão do motor (P), torna-se máxima (P_{max}). A Equação 25 é formulada.

$$P = \frac{P_{max}(S - B)}{S - B\cos(x - a)} = \frac{P_{max}(1 - c)}{1 - c.\cos(x - a)} \quad (25)$$

O diagrama P-V do motor Stirling tipo Alfa pode ser feito utilizando as equações descritas acima.

A energia indicada do motor (área do diagrama P-V) na compressão e expansão pode ser calculada como uma solução analítica com o uso dos coeficientes citados acima. A energia indicada no espaço de expansão (W_E), em função da pressão média (P_{med}), da pressão mínima (P_{min}) e da pressão máxima (P_{max}) é descrita na Equação 26.

$$\begin{aligned} W_E = \int P dV_E &= \frac{P_{med}V_{SE}\pi c.\text{sen } a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min}V_{SE}\pi c.\text{sen } a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \\ &= \frac{P_{max}V_{SE}\pi c.\text{sen } a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \end{aligned} \quad (26)$$

A energia indicada no espaço de compressão (W_C) é descrita na Equação 27.

$$\begin{aligned} W_C = \int P dV_C &= -\frac{P_{med}V_{SE}\pi ct.\text{sen } a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = -\frac{P_{min}V_{SE}\pi ct.\text{sen } a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \\ &= -\frac{P_{max}V_{SE}\pi ct.\text{sen } a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \end{aligned} \quad (27)$$

A energia indicada para um ciclo deste motor (W_i) é descrita pela equação seguinte:

$$\begin{aligned}
 W_i = W_E + W_C &= \frac{P_{med} V_{SE} \pi c (1-t) \sen a}{1 + \sqrt{1-c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1-t) \sen a}{1 + \sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} \\
 &= \frac{P_{max} V_{SE} \pi c (1-t) \sen a}{1 + \sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}}
 \end{aligned} \tag{28}$$

Relações entre P_{med} , P_{min} e P_{max} são determinadas pelas equações seguintes.

$$\frac{P_{min}}{P_{med}} = \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \tag{29}$$

$$\frac{P_{max}}{P_{med}} = \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \tag{30}$$

A potência indicada de expansão (L_E), a potência indicada de compressão (L_C) e potência indicada do motor (L_i) são definidas pelas equações seguintes, utilizando a rotação do motor (n).

$$L_E = W_E n \tag{31}$$

$$L_C = W_C n \tag{32}$$

$$L_i = W_i n \tag{33}$$

A energia indicada de expansão (W_E) encontrada através da Equação 26 é relacionada ao calor adicionado da fonte quente do motor. A energia indicada de compressão (W_C) calculada através da Equação 27 é relacionada ao calor rejeitado do motor para o fluido de resfriamento. Então a eficiência térmica do motor (e) é calculada pela equação seguinte.

$$e = \frac{W_i}{W_E} = 1 - t \tag{34}$$

Esta eficiência é igual ao de um ciclo de Carnot que é a mais alta eficiência dentre todos os motores térmicos (Hirata, 1995).

4. PROJETO DO MOTOR

O trabalho atual, tem como principal objetivo o projeto e execução de um motor Stirling didático de baixo custo, que sirva de fonte de conhecimento e pesquisa.

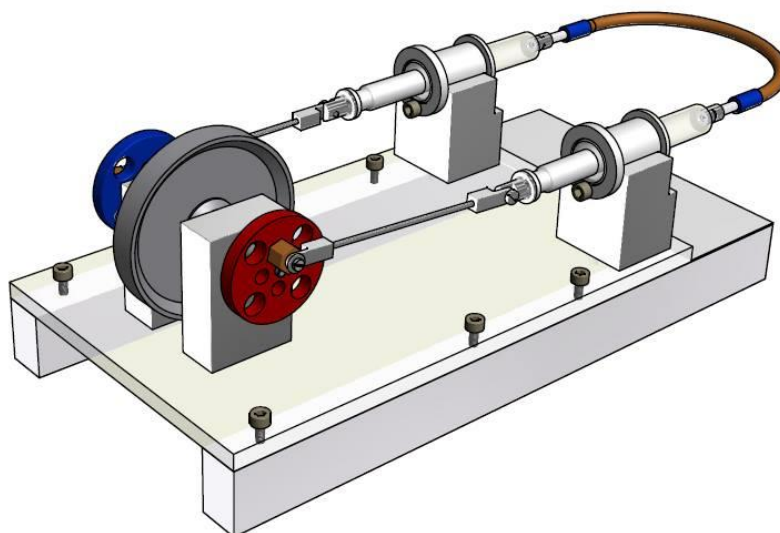
4.1 DESCRIÇÃO GERAL

Tendo em vista a sua simplicidade de funcionamento e de materiais acessíveis, optou-se por um motor Stirling tipo Alfa, o mesmo que tem o princípio de funcionamento explicado detalhadamente com a teoria de Shmidt. Essa teoria serviu de base para o projeto em geral.

O projeto do motor é idealizado sobre o ponto de vista didático, a partir da energia proveniente de uma fonte de calor, que será feita por uma chama, futuramente o motor poderá ser acionado por energia solar. Trata-se de um motor Stirling de baixas temperaturas, esse motor se caracteriza por ter um espaço de expansão maior que o espaço de compressão.

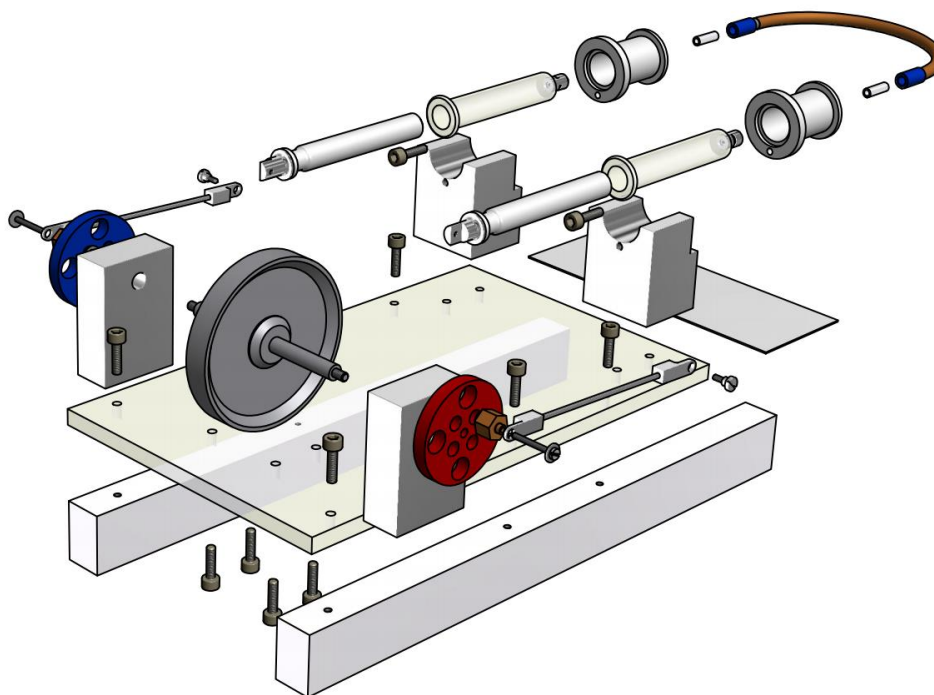
O motor projetado pode ser visto de forma geral pela Figura 20, e fornece a ideia geral da forma construtiva do motor. O mesmo foi pensado de forma a ter uma fácil fabricação e com materiais de fácil aquisição.

Figura 20: Desenho esquemático do motor



Com essa forma construtiva, aplicando os dados de projeto à metodologia na Seção 3, esse motor deve servir para uso didático e funcionar conforme o princípio de um motor Stirling Alfa apresentado na Seção 2.2.1.

Figura 21: Vista explodida do motor



4.2 CÂMARA E PISTÃO DE EXPANSÃO

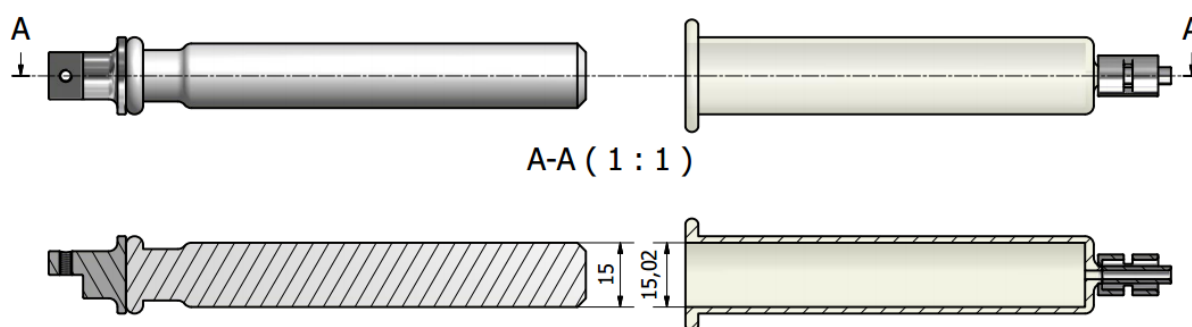
As câmaras de expansão e compressão são as limitações do projeto em função dos materiais acessíveis. Essas câmaras devem ter o atrito reduzido e a vedação perfeita. Tendo em vista o custo alto de fabricação de uma peça nesse nível, foi escolhido seringas ortodônticas de vidro de 10ml, como a mostrada na Figura 22.

Figura 22: Seringa utilizada como câmara de expansão e compressão



Essas seringas possuem um ajuste entre o êmbolo e o cilindro de 0,02 mm, isso faz com que ela seja perfeita para o projeto proposto. Para diminuir o atrito do pistão, a seringa foi lubrificada com grafite.

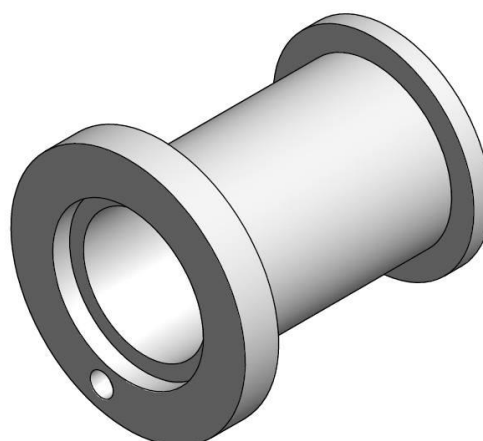
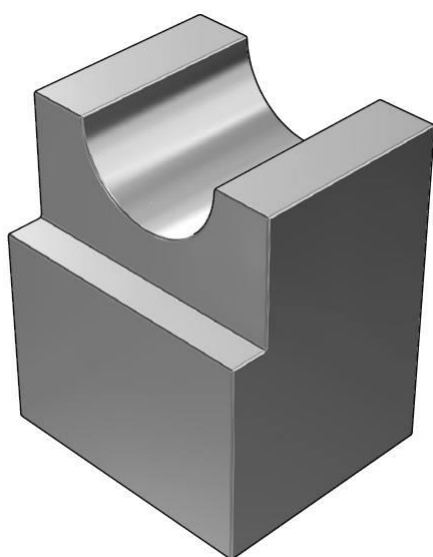
Figura 23: Ajuste entre êmbolo e cilindro



Como o cilindro é feito de vidro, não é possível a concentração de esforços em partes isoladas quando se trata da fixação, pois esses esforços geram deformações que impossibilitam o funcionamento perfeito afetando o ajuste entre cilindro e êmbolo. Para resolver esse problema, foi projetada uma base (Figura 24) acoplada a uma bucha de fixação (Figura 25) que proporcione a distribuição homogênea das tensões em todos os pontos radiais da seringa.

Figura 24: Suporte de fixação das câmaras.

Figura 25: Bucha de fixação das câmaras.



Como a peça da Figura 25 é feita para a seringa entrar com folga de 3mm, esse espaço deve ser preenchido com material resistente a temperatura e que fixe o cilindro quente com a distribuição correta de tensões. Foi escolhido o silicone em gel, em função da sua boa capacidade de suportar temperatura (aproximadamente 300°C) e da boa resistência mecânica após a sua secagem. O gel silicone será introduzido de modo a preencher todo espaço entre seringa e bucha de fixação, mas fora do espaço que irá entrar em contato com a chama.

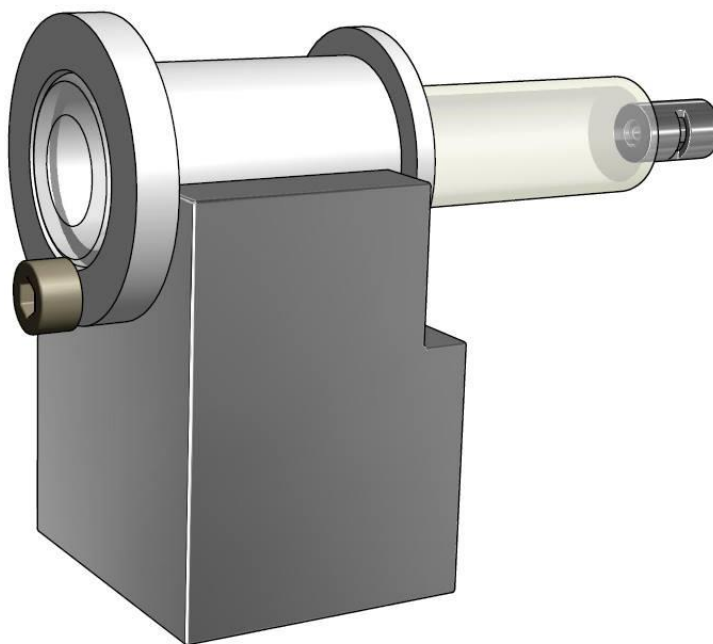
Quanto aos volumes, o volume morto adotado no cilindro quente foi $V_{DE} = 2,6cm^3$ e o volume percorrido de $V_{SE} = 3,8cm^3$, levando em conta o volume morto e percorrido do cilindro frio, volume do regenerador e ângulo de fase, que serão explicados a seguir.

4.3 CÂMARA E PISTÃO DE COMPRESSÃO E VOLUME MORTO

Como dito anteriormente a câmara de compressão são, juntamente com a de expansão, as limitações do projeto. Sendo assim todo cálculo do motor deve ser feito a partir disso.

Os mesmos suporte e bucha de fixação foram feitos para a câmara de compressão e o passo a passo de montagem é o mesmo que o da câmara de expansão. Porém o volume morto de $V_{DC} = 1cm^3$ é menor que o do cilindro quente. O curso do pistão também foi ajustado para $V_{SC} = 3,8cm^3$. Isso foi feito para que a área em contato com a chama do cilindro quente seja maior, proporcionando uma melhor absorção de calor pela seringa. Como dito por Martini (1979) em um design prático de um motor Stirling, o volume morto total pode ser de até aproximadamente 58% do volume total. No motor atual, o volume morto total é de 48% do volume total, o que obedece a citação acima.

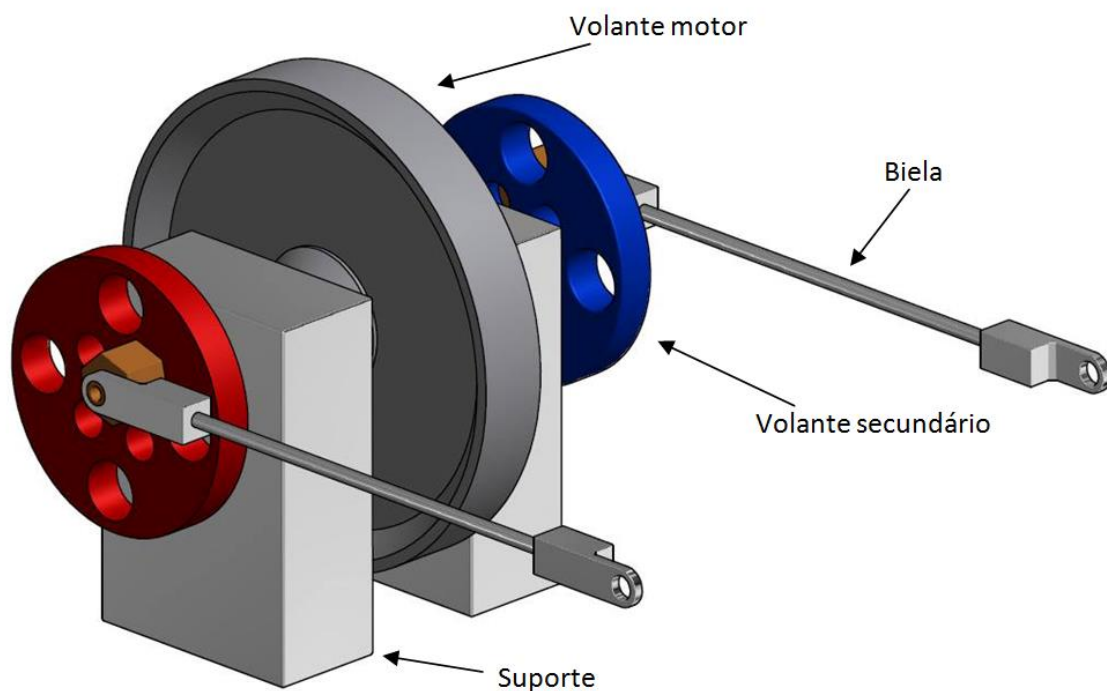
Figura 26: Conjunto suporte, bucha e cilindro



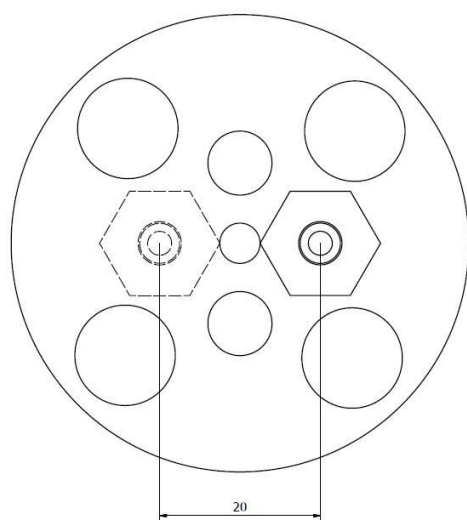
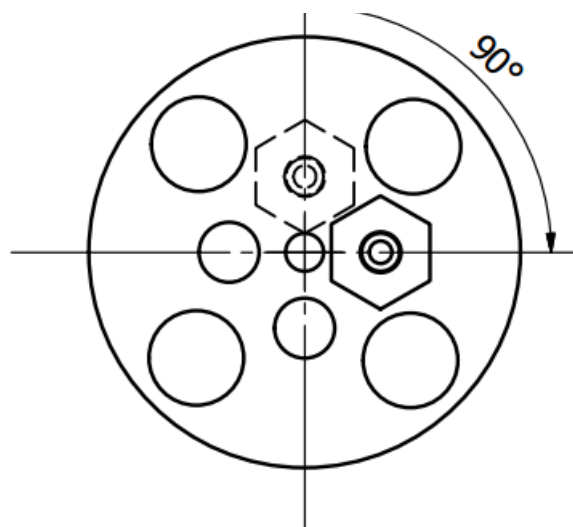
Ambas seringas foram lubrificadas com grafite e possuem a mesma folga entre pistão e cilindro.

4.4 VIRABREQUIM E VOLANTE

Devido a complexidade do processo de fabricação de um virabrequim, o mesmo foi desenvolvido em várias peças para facilitar a confecção, tornando assim peças com geometria simplificada. A Figura 27 mostra uma vista geral do virabrequim montado ao volante sobre o suporte de sustentação.

Figura 27: Virabrequim e volante

Os suportes serão usinados em alumínio com furos para o encaixe do rolamento. A biela se encaixa em um disco secundário com raio de giro de 10mm, o que proporciona um curso de 20mm nas câmaras quente e fria, como representado na Figura 28. O ângulo de fase foi definido como $dx = 90^\circ$.

Figura 28: Curso das câmaras**Figura 29:** Representação do ângulo de fase dx 

Após a conclusão das variáveis iniciais temos como resultado a Tabela 4, com os valores apresentados anteriormente.

Tabela 4: Valores definidos com projeto

Nome	Símbolo	Unidade	Valor
Volume percorrido pelo pistão de expansão ou de deslocamento	V_{SE}	cm^3	3,8
Volume percorrido pelo pistão de compressão ou de potência	V_{SC}	cm^3	3,8
Volume morto do cilindro de expansão	V_{DE}	cm^3	2,6
Volume morto do cilindro de compressão	V_{DC}	cm^3	1
Volume percorrido relativo	v		1
Volume morto relativo expansão	X_{DE}		0,684
Volume morto relativo compressão	X_{DC}		0,263
Volume morto relativo regenerador	X_R		0,91
Volume do regenerador	V_R	cm^3	3,46
Ângulo de fase	dx	°	90

4.5 CUSTOS

Após a finalização dos desenhos do projeto, foi feito um orçamento com o gasto estimado para a fabricação do motor. Este orçamento é apresentado pela Tabela 5.

Tabela 5: Orçamento dos materiais necessário para a construção do motor

Item	Observação	Valor (R\$)
Seringas	-	110,00
Volante	Material e usinagem	50,00
Base de acrílico	-	50,00
Rolamentos	-	35,00
Bielas	-	10,00
Mancal volante	Material e usinagem	50,00
Volante secundário	Material e usinagem	25,00

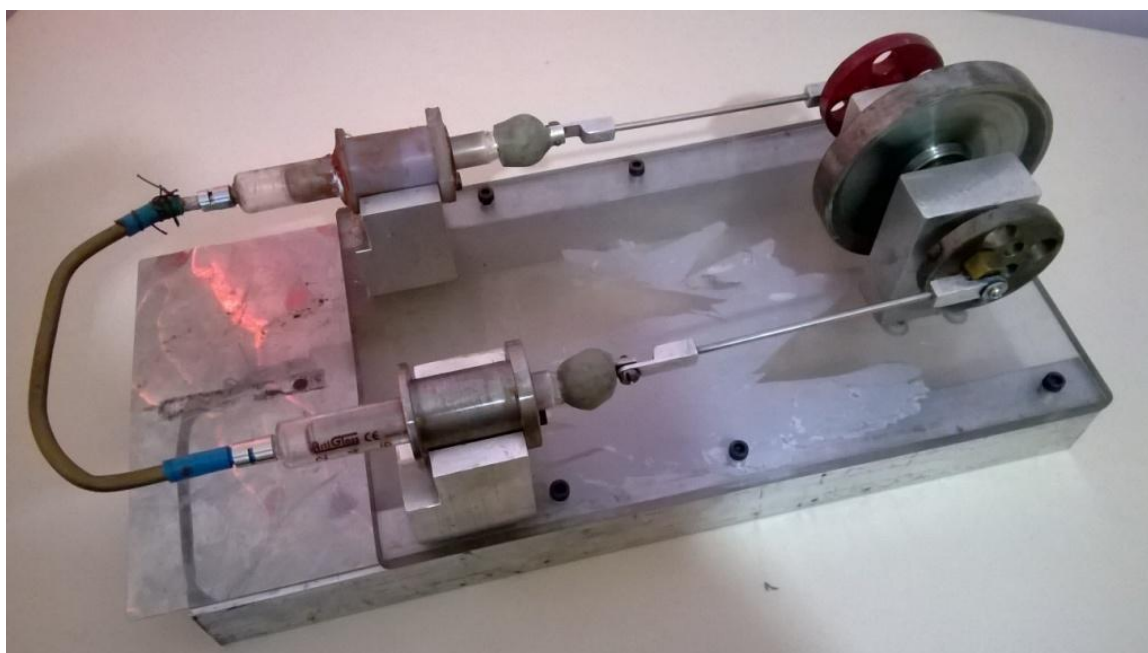
Lamparina	Material e usinagem	20,00
Barras da base	Material e usinagem	70,00
Grafite	-	1,50
Chapa de inox	-	10,00
Massa epóxi	-	8,00
Silicone alta temperatura	-	12,00
Buchas	Material e usinagem	60,00
Base das seringas	Material e usinagem	60,00
Tubo de cobre	-	5,00
Mangueiras de conexão	-	5,00
Parafusos	-	10,00
Lixas	-	5,00
Total	-	596,50

5. SÍNTESE DOS TESTES REALIZADOS

A construção de motores Stirling data de 1816, porém muitos estudos estão sendo movidos em prol do funcionamento do sistema e melhorias. Algumas conclusões podem ser tiradas dos ensaios realizados. Cada motor Stirling deve ser projetado para uma dada temperatura de funcionamento. Esse motor apresenta algumas particularidades bem específicas, dentre elas é notável a variação volumétrica do sistema, essa variação irá propiciar um aumento de pressão o qual impulsionará o pistão à frente, porém se não for feito uma análise da expansão volumétrica, não se pode saber o curso que o pistão irá desenvolver, pois o curso está diretamente ligado a expansão do gás na câmara de expansão, e da temperatura da mesma. A expansão do gás de trabalho está diretamente relacionada a temperatura a que a câmara de expansão será submetida.

Para avaliar o funcionamento do protótipo, após sua construção foram realizados alguns testes. Para esses testes, foi adotado como referência a massa de ar contida no motor, que foi calculado com a Equação 3. A rotação foi monitorada com o auxílio de um tacômetro digital e a temperatura com um termômetro.

Figura 30: Protótipo construído



Após a coleta dos dados, os valores foram interpretados de acordo com a teoria de Scmidt contida na Seção 3 e, também, foi plotado os diagramas PV e de aceleração em função do tempo.

5.1 TESTE 1

Os resultados do teste 1 são apresentados na Tabela 6. Foi utilizado a massa $m = 0,0000135 \text{ kg}$ de ar atmosférico.

Foi observado a rotação máxima de $n = 237 \text{ rpm}$ e gerado uma potência de $L_i = 0,32 \text{ W}$. Pode parecer pouco, mas o motor possui dimensões reduzidas, quando comparado a um motor industrial, e limitações de pressão e temperatura, em função dos materiais de baixo custo utilizados

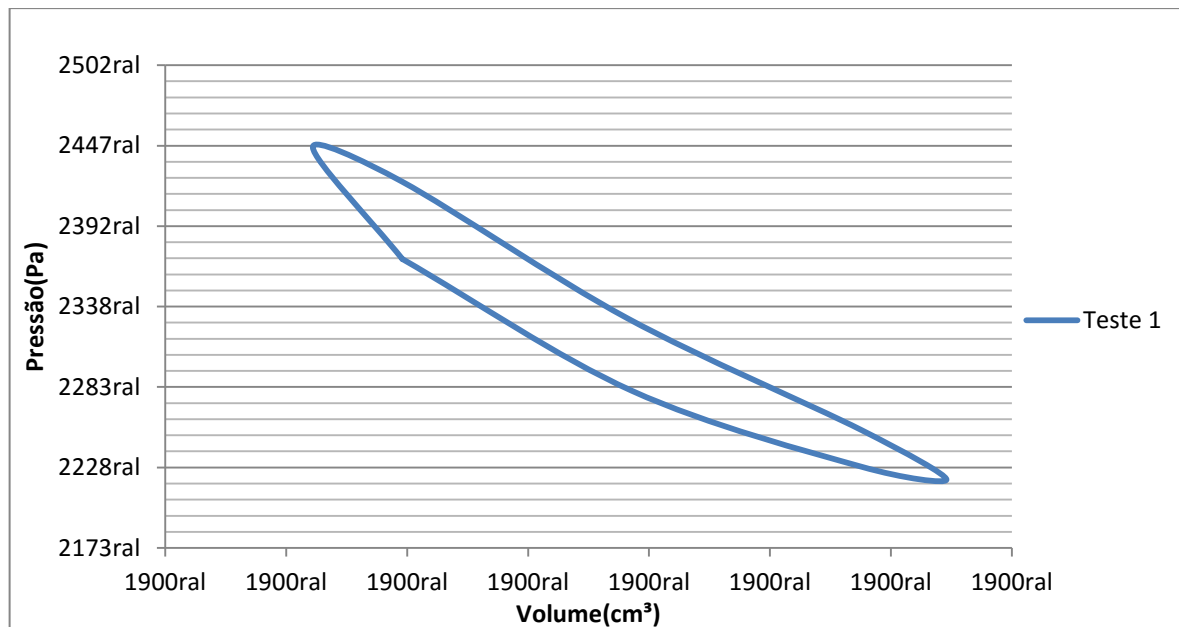
Tabela 6: Resultado do teste 1

Nome	Símbolo	Unidade	Valor
Massa total do gás de trabalho.	m	kg	0,0000135
Constante universal dos gases	R	J/kgK	286,9
Temperatura do gás no cilindro de expansão	T_E	K	512
Temperatura do gás no cilindro de compressão	T_C	K	318
Temperatura do gás no regenerador	T_R	K	415
Temperatura relativa	t		0,601
Velocidade de rotação do motor	n	Hz	3,95
Energia de expansão	W_E	J	0,2136
Energia de compressão	W_C	J	-0,1326
Energia do motor	W_i	J	0,081
Potência de expansão	L_E	W	0,85
Potência de compressão	L_C	W	0,52
Potência do motor	L_i	W	0,32
Eficiência do motor	e		0,38
Pressão mínima	P_{min}	Pa	116330
Pressão Média	P_{med}	Pa	153130

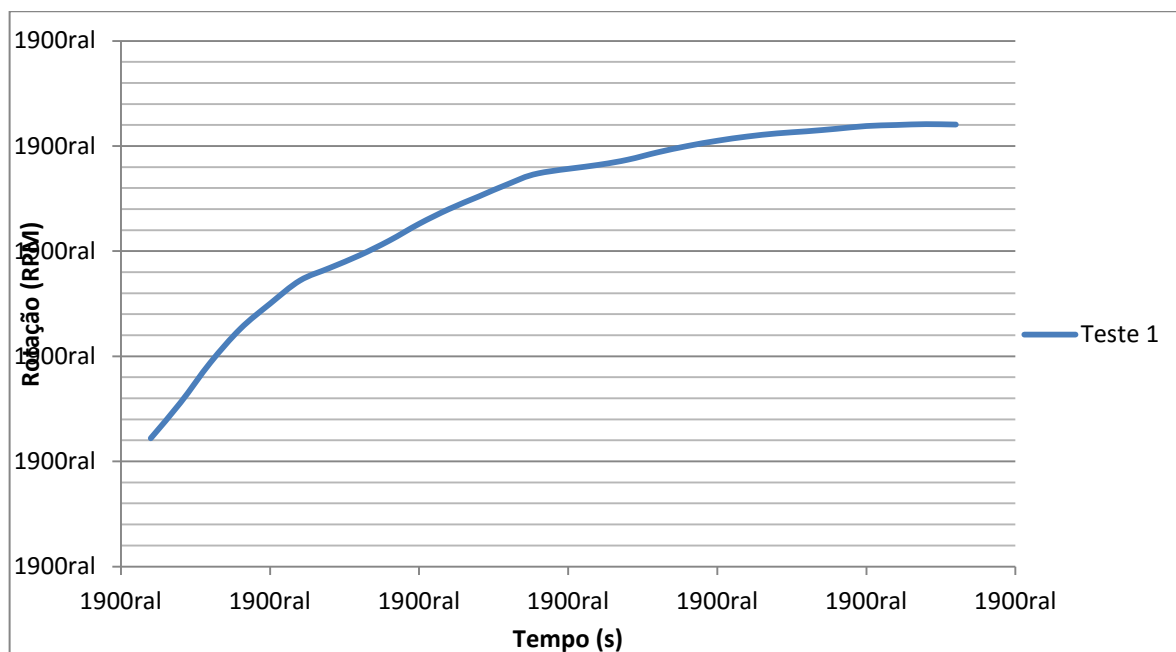
O Gráfico 1 representa o diagrama PV do teste 1, e está de acordo com a Figura 2, que mostra o ciclo ideal para esse tipo de motor.

O diagrama PV foi feito a partir da Equação 19 para os valores de pressão e das Equações de 4 a 6 para os valores de volume.

Gráfico 1: Diagrama PV do teste 1



O Gráfico 2 representa a curva de rotação em função do tempo. Através desse esboço podemos perceber as regiões de maior aceleração representada pela inclinação da curva. Quando maior for a inclinação da curva, maior será a aceleração instantânea, e conseqüentemente, o torque do motor

Gráfico 2: Curva RPM x Tempo do teste 1

5.2 TESTE 2

Os resultados do teste 2 são apresentados na Tabela 7. Foi utilizado a massa $m = 0,0000159\text{kg}$ de ar atmosférico.

Foi observado a rotação máxima de $n = 273\text{ rpm}$ e gerado uma potência de $L_i = 0,46\text{ W}$.

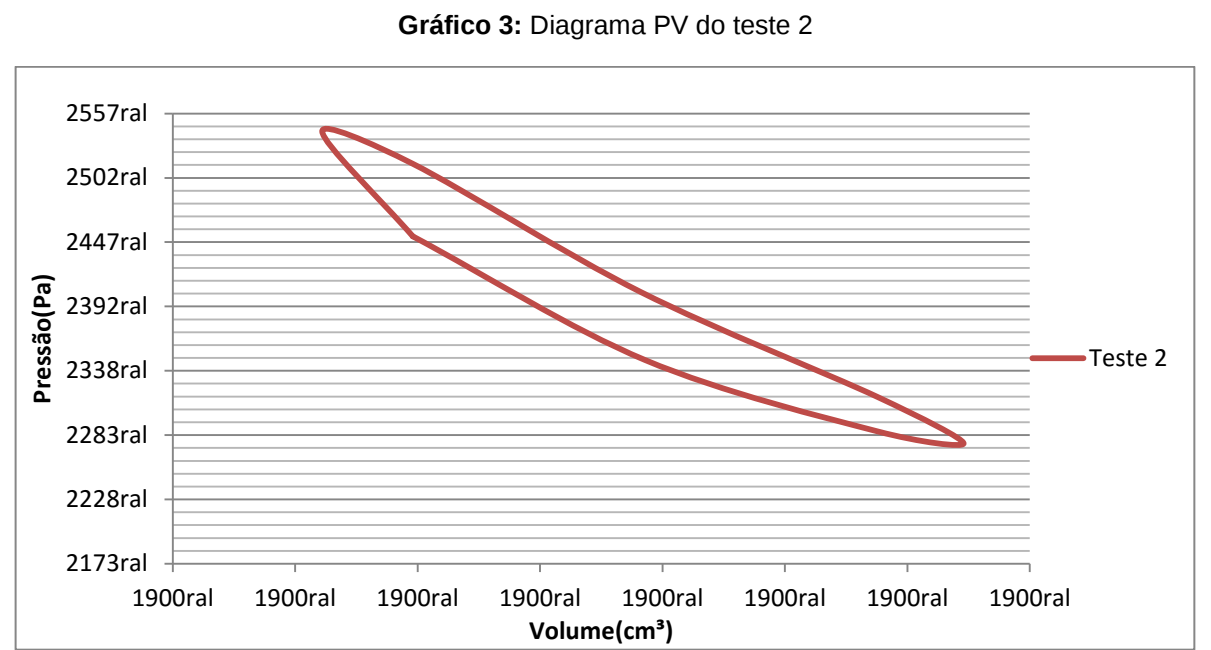
Tabela 7: Resultado do teste 2

Nome	Símbolo	Unidade	Valor
Massa total do gás de trabalho.	m	kg	0,0000159
Constante universal dos gases (ar)	R	J/kgK	286,9
Temperatura do gás no cilindro de expansão	T_E	K	512
Temperatura do gás no cilindro de compressão	T_C	K	318
Temperatura do gás no regenerador	T_R	K	415
Temperatura relativa	t		0,621
Velocidade de rotação do motor	n	Hz	4,56
Energia de expansão	W_E	J	0,26
Energia de compressão	W_C	J	-0,16

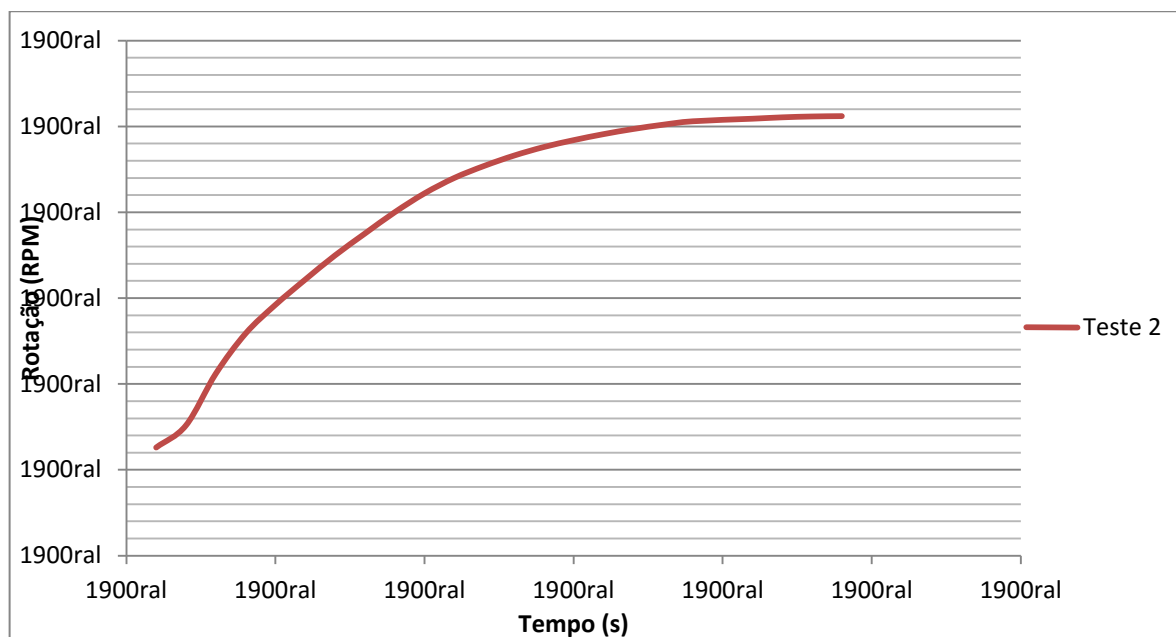
Energia do motor	W_i	J	0,1
Potência de expansão	L_E	W	1,19
Potência de compressão	L_C	W	-0,73
Potência do motor	L_i	W	0,46
Eficiência térmica do motor	e		0,38
Pressão mínima	P_{min}	Pa	136640
Pressão Média	P_{med}	Pa	179860

O Gráfico 3 representa o diagrama PV do teste 2 e, também, está de acordo com a Figura 2, que mostra o ciclo ideal para esse tipo de motor.

O diagrama PV foi feito a partir da Equação 19 para os valores de pressão e das Equações de 4 a 6 para os valores de volume.



O gráfico 4 representa a curva de rotação em função do tempo. Através desse esboço podemos perceber as regiões de maior aceleração representada pela inclinação da curva. Quando maior for a inclinação da curva, maior será a aceleração instantânea, e consequentemente, o torque do motor

Gráfico 4: Diagrama RPM x Tempo do teste 2

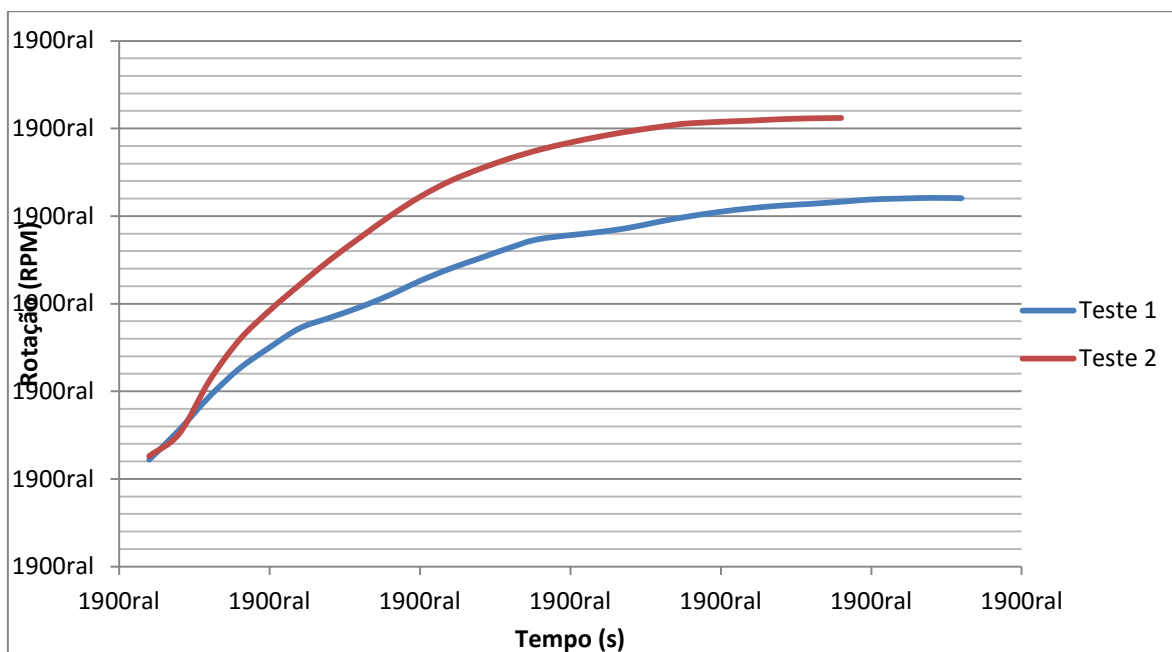
5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Fazendo uma análise dos testes. Foi observado que qualquer mudança da massa de ar contida no motor pode ocasionar uma diferença de funcionamento. Ao Teste 2 foi adicionado aproximadamente 18% a mais da massa contida no Teste 1. Isso acarretou um aumento de rotação de 237 rpm para 273 rpm.

O diagrama P-V dos Testes também foram diferenciados. Naturalmente, a área do diagrama do Teste 2 é maior que a do Teste 1, pois ela representa a energia gerada durante o ciclo.

Analisando o Gráfico 5, foi notado a diferença de inclinação das curvas. Isso representa a diferença de aceleração entre os Testes 1 e 2. Como a curva do Teste 1 apresenta uma inclinação mais atenuada, concluímos que ele possui uma maior aceleração e torque, quando comparado com o Teste 2.

Gráfico 5: Comparação entre os Teste 1 e 2. RPM x segundos.



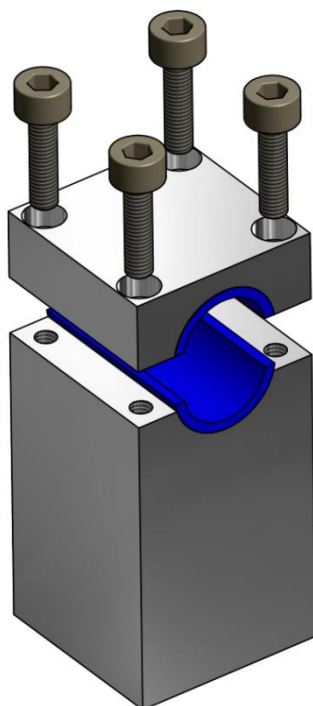
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

6.1.1 Fixação dos cilindros de expansão e compressão

Inicialmente as seringas seriam fixadas por uma base conforme representado na Figura 31. A proposta não foi viável, pois os esforços não eram distribuídos uniformemente no cilindro, eles concentravam tensões e faziam com que o dispositivo fosse deformado. Essa deformação causava dificuldade de movimentação do êmbolo e trincas, inutilizando as seringas.

Figura 31: Base não utilizada.

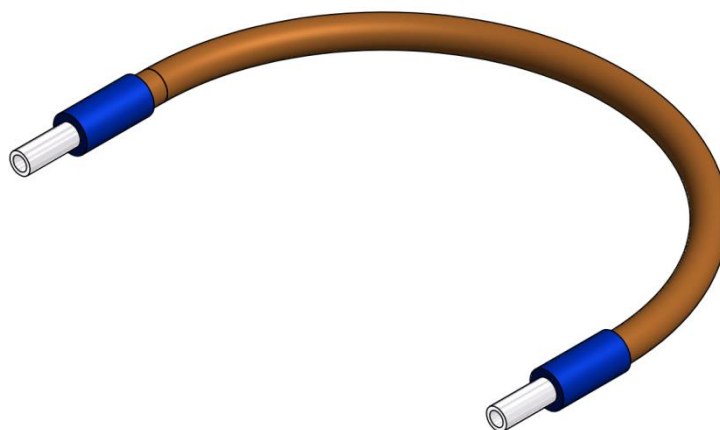


6.1.2 Vedação

Foi a maior dificuldade encontrada, principalmente na câmara de expansão. Materiais que proporcionam uma boa vedação são pouco resistentes a temperatura. Com o aumento da temperatura, a borracha que faz a vedação do tubo de cobre que

se encaixa no cilindro quente perde resistência e suporta menos pressão, por causa disso, este era um dos limitadores do projeto.

Figura 32: Regenerador



Como o espaço entre êmbolo e cilindro são mínimos, este não foi considerado um problema quando se trata de vedação.

6.1.3 Atrito entre êmbolo e cilindro

As seringas vem de fábrica com uma folga de 0,02mm. Por ser uma folga muito pequena, o atrito do conjunto era elevado para o bom funcionamento do motor. Para solucionar esse problema, o embolo foi lixado e posteriormente lubrificado com grafite. Isso proporcionou um atrito aceitável para o bom funcionamento do sistema.

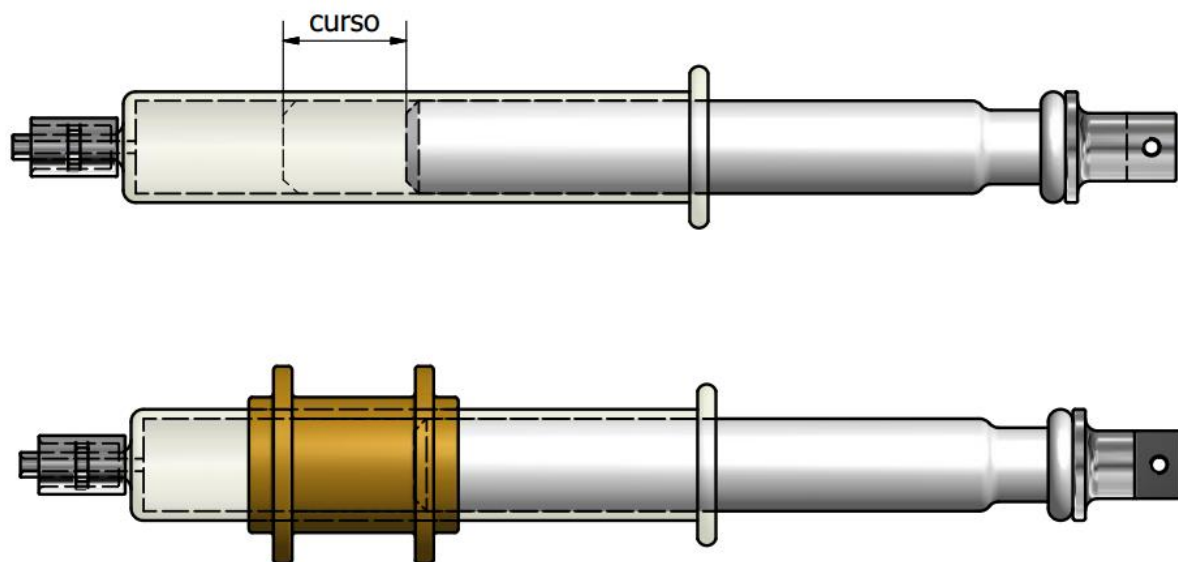
6.1.4 Resistência à temperatura do cilindro de expansão

A temperatura da câmara de expansão é limitada, pois as seringas não foram projetadas para suportar elevadas temperaturas. A proximidade excessiva da chama com o cilindro pode provocar trincas.

Para solucionar esse problema, optou-se pelo corte da seringa e a adição de uma bucha de bronze, como ilustrado na Figura 33, na região onde há contato com a chama. O bronze possui uma boa condutividade térmica, isso poderia melhorar o

funcionamento do motor. Porém não foi possível adicionar a este dispositivo uma vedação perfeita, sendo assim, o sistema não foi utilizado.

Figura 33: Representação da bucha de bronze.



6.2 CONCLUSÃO

Apesar de muita antiga, pouco se pesquisou sobre a tecnologia dos motores Stirling e o que pode ser observado é que essa tecnologia pode servir como opção para geração de energia em um futuro próximo, tendo em vista a poluição e desastres ambientais que outras formas de geração de energia causam.

Durante as análises e testes feitos com a maquete, foi notável o que todas as literaturas tratam sobre o difícil acerto para o perfeito funcionamento desses motores, o que se percebeu na prática vivida, mas o fato de um breve funcionamento da maquete pode elucidar melhor e dar novo animo durante a pesquisa.

Com as dificuldades e contratempos do projeto, foi adquirido o *Know-how* necessário para o desenvolvimento de projetos futuros.

Através dos resultados observados no Capítulo 5, foi observado que com os dados utilizados o motor gera pouca potência. E por mínimo que seja a adição de massa,

isso pode alterar o funcionamento do motor, aumentando a rotação e gerando mais energia.

Com certeza esse tema é longo e muito tem a ser estudado na área, para que um dia possamos ter uma energia limpa de verdade, pois é isso que será a energia proveniente do uso de motores Stirling, principalmente se não for utilizado nenhum gás tóxico como fluido de trabalho.

6.3 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Aquecimento do câmara de expansão com energia solar e elaboração de um sistema responsável pela concentração dos raios solares com ajuste automático da trajetória do sol.

Estudo da influência do volume morto no funcionamento do motor Stirling.

Projeto e análise de um regenerador.

Desenvolvimento de um sistema de combustão mais eficiente, sem tantas perdas por convecção e radiação com o meio externo.

Análise de como o curso dos cilindros influenciam na potência e no torque do motor.

7. BIBLIOGRAFIA

FERNANDES, B.L.; SOUSA, R.P. **Motor Stirling**. Centro Universitário Salesiano Campinas. Campinas. 2010

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

CRUZ, Vinícius G. **Desenvolvimento Experimental de um Motor Stirling Tipo Gama**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. 2012.

CORRIA, M. E.; COBAS, V. M.; LORA, E. S. **Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil**. Elsevier. vol.34, p. 3403-3405. 2006.

THOMBARE, D. G; VERMA, S. K. Technological Development in the Stirling cycle engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, India, v. 12, p 30-31, 2008.

MARTINI, W.R. Stirling Engine Design Manual. National Aeronautics and Space Administration (NASA). 1983.

CLARKE M.A.; READER G.T.; TAYLOR D.R. **Experiences in the commissioning of a prototype 20 kW helium charged Stirling engine**. In: Seventeenth intersociety energy conversion engineering conference. London. v. 829298. p. 1796–1800. 1983.

BEALE, W.T.; WOOD, J.G.; CHAGNOT, B.F. **Stirling engine for developing countries**. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1971.

MICHELS, A.P.J. **The Philips Stirling engine: a study of its efficiency as a function of operating temperatures and working fluids**. IFCEO record. p. 1506-1510. 1976.

SCHMIDT, G. **Classical analysis of operation of Stirling engine**. German Engineering Union (Original German). vol. 15, p.1-12. 1871.

HIRATA, K. Schmidt theory for Stirling Engines. Stirling Engine home page. Disponível em: <<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/>>. Acesso em 10 jan. 2014.

SULZBACH, Jaimir. **Projeto e fabricação de um motor stirling modelo didático**. Panambi: UNIJUI, 2010.

MARTINI, W.B. Stirling engine design manual. In: M.J. Collie, editora. **Stirling engine design and feasibility for automotive use**. New Jersey: Noyes, 1979. p. 60.

PEREIRA, Felipa. Classificação dos Motores Stirling Conforme a Configuração. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/motordestirling/motor-de-stirling/classificacao-dos-motores>>. Acesso em 25 nov. 2013.

PAUTZ, Edson R. **Estudo e Projeto de um Motor Stirling**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013.

MÍREZ, Jorge. Matlab/Simulink in Renewable Energy. Disponível em: <<http://jmirez.wordpress.com/>> . Acesso em 13 out. 2013.