



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE  
CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

## **MONTAGEM E MELHORAMENTOS DO MOTOR STIRLING PARA O USO EM BANCADAS DE ESTUDOS**

**Jeziel Fande de Oliveira**

**2023**

**CAMPO GRANDE / MS**

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA**

**MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**MONTAGEM E MELHORAMENTOS DO MOTOR STIRLING PARA  
O USO EM BANCADAS DE ESTUDOS**

**JEZIEL FANDE DE OLIVEIRA**

Dissertação do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração em Eficiência Energética.

**Orientador: Prof. Dr. Frederico Silva Moreira**

CAMPO GRANDE

Maio / 2023



Serviço Público Federal  
Ministério da Educação  
**Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**JEZIEL FANDE DE OLIVEIRA**

### **MONTAGEM E MELHORAMENTOS DO MOTOR STIRLING PARA O USO EM BANCADA DE ESTUDOS**

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em 04 de maio de 2023, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

**Banca examinadora:**

**Dr. Frederico Silva Moreira - ( Orientador)**

**Dr. Sandro Petry Laureano Leme.**

**Dr. Luigi Galotto Junior.**

**Dra. Andrea Teresa Riccio Barbosa.**

**Dr. Jair de Jesus Fiorentino.**



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Silva Moreira, Professor do Magisterio Superior**, em 26/05/2023, às 17:13, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luigi Galotto Junior, Professor do Magisterio Superior**, em 29/05/2023, às 16:15, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sandro Petry Laureano Leme, Professor do Magisterio Superior**, em 30/05/2023, às 15:07, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufms.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4094369** e o código CRC **14C1F6AC**.

## COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

## RESUMO

A procura por novas fontes de energia, de forma sustentável e barata, é crescente. Apesar de ter sido inventado a mais de 200 anos, o motor Stirling até hoje não é muito conhecido pela população em geral e a sua produção não é feita em larga escala. Estudos recentes, combinados com o desenvolvimento de novas tecnologias, trazem de volta o interesse nesse tipo de motor, permitindo um aumento na sua eficiência e aplicabilidade. O objetivo deste trabalho é analisar o motor Stirling como aplicação de trabalho prático e instrumento de inovação no processo de aprendizagem dos cursos de engenharia. Serão feitos ajustes e modificações no sistema, para que os testes de geração e cogeração de energia, utilizando o motor Stirling, seja o mais didático possível, de forma que os alunos da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS possam observar na prática os princípios de funcionamento deste equipamento. Juntamente com a execução de testes e experimentos relacionados a geração de eletricidade, utilizando o gás GLP para produzir a energia térmica para seu funcionamento, espera-se mostrar que o motor Stirling pode ser uma alternativa viável e competitiva no aproveitamento da energia térmica, podendo funcionar com qualquer fonte de calor externa, até mesmo com fontes renováveis. Para isso, foram feitas alterações e atualizações num protótipo de motor Stirling Genoa 3, que permitirão efetuar novos testes para a geração da energia elétrica, contribuindo assim com a capacidade de aprendizado dos futuros engenheiros, divulgando o motor Stirling e todo o conhecimento por traz desta tecnologia. Este trabalho servirá de referência para a UFMS e outras instituições de ensino que queiram desenvolver trabalhos utilizando o motor Stirling.

Palavras – chave: Cogeração, motor Stirling, eficiência energética.

## ABSTRACT

The search for new sources of energy, in a sustainable and cheap way, is growing. Despite having been invented more than 200 years ago, the Stirling engine is still not well known by the general population and its production is not carried out on a large scale. Recent studies, combined with the development of new technologies, bring back the interest in this type of engine, allowing an increase in its efficiency and applicability. The objective of this work is to analyze the Stirling engine as an application of practical work and an instrument of innovation, in the learning process of engineering courses. Adjustments and modifications will be made to the system, so that the tests of energy generation and cogeneration, using the Stirling engine, are as didactic as possible, so that students from the Federal University of Mato Grosso do Sul - UFMS can observe in practice the operating principles of this equipment. Along with the execution of tests and experiments related to electricity generation, using LPG gas to produce thermal energy for its operation, it is expected to show that the Stirling engine can be a viable and competitive alternative in the use of thermal energy, being able to work with any external heat source, even with renewable sources. For this, changes and updates were made to a Stirling Genoa 3 engine prototype, which will allow new tests to be carried out for the generation of electric energy, thus contributing to the learning ability of future engineers, disseminating the Stirling engine and all the knowledge behind this technology. This work will serve as a reference for UFMS and other educational institutions that want to develop works using the Stirling engine.

Keywords: Cogeneration, Stirling engine, energy efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo real e ideal de um motor Stirling .....	16
Figura 2 - Desenho da patente do motor Stirling de Robert Stirling.....	17
Figura 3 - Visão do motor Stirling Genoa 03 em corte .....	18
Figura 4 - Compressão em motor Stirling tipo Alfa .....	19
Figura 5 - Aquecimento em motor Stirling tipo Alfa .....	20
Figura 6 - Expansão em motor Stirling tipo Alfa.....	20
Figura 7- Rejeição de calor em motor Stirling tipo Alfa .....	21
Figura 8 - Princípio de Funcionamento do Motor Stirling tipo Alfa .....	21
Figura 9 - Configuração motores Stirling.....	22
Figura 10 - Motores Stirling tipo alfa, beta e gama.....	23
Figura 11 - Protótipo Motor Stirling modelo GE03-0014 .....	28
Figura 12 - Moto gerador DC.....	28
Figura 13 - Unidade de controle de sensores e interface .....	28
Figura 14 - Conector do sensor de pressão HPS-C .....	29
Figura 15 - Suporte para máquina e forno para combustão.....	29
Figura 16 - Mangueira para gás GLP com bico de cerâmica e regular de pressão.....	29
Figura 17 - Radiador para refrigeração e bomba de circulação .....	30
Figura 18 - Reservatório de água.....	30
Figura 19 - Localização das hastes dos pistões no bloco do motor.....	32
Figura 20 - Virabrequim e rolamentos da biela.....	32
Figura 21 - Excêntrico do virabrequim e bielas .....	32
Figura 22 - Assento do volante vista interna e externa ao bloco.....	33
Figura 23 - Bloco com pistões e anéis de vedação .....	33
Figura 24 - Trocadores de calor e dissipadores de calor .....	34
Figura 25 - Dissipador de calor desmontado.....	34
Figura 26 - Motor Stirling conectado ao gerador .....	35
Figura 27 - Motor Stirling e fonte DC conectado ao gerador .....	35
Figura 28 - Tubulações de entrada de gás de trabalho .....	36

Figura 29 - Motor Stirling Genoa 03 BATLAB/UFMS .....	37
Figura 30 - Motor Stirling Genoa 03 sem a tampa de pressurização .....	38
Figura 31 - Motor Stirling Genoa 03 sem a corrente e a coroa da transmissão .....	38
Figura 32 - Tampa e a coroa da transmissão do motor Stirling Genoa 03 .....	39
Figura 33 - Eixo do virabrequim do Motor Stirling Genoa 03 .....	39
Figura 34 - Verificações das medidas para a usinagem.....	40
Figura 35 - Tarugo de aço Sae 4140 .....	40
Figura 36 - Instalação para teste de medida do flange usinada.....	41
Figura 37 - Abertura da rosca do bloco .....	41
Figura 38 - Usinagem do eixo do motor para o uso de chaveta .....	42
Figura 39 - Flange pronta para a instalação .....	42
Figura 40 - Base do motor Stirling pronta para a instalação da flange .....	43
Figura 41 - Flange instalada no motor Stirling e com a chaveta no eixo pronta para a instalação da polia .....	43
Figura 42 - Polia canal B do motor e gerador .....	44
Figura 43 - Motor Stirling Genoa 03 com modificações propostas.....	45
Figura 44 - Fluxo do sistema hidráulico.....	46
Figura 45 - Ligações do sistema pneumático .....	47
Figura 46 - Medidor de vazão de gás.....	48
Figura 47 - Medidor fluxo digital .....	48
Figura 48 - Termopar Tipo K .....	49
Figura 49 - Tacômetro digital.....	49
Figura 50 - Osciloscópio Agilent .....	50
Figura 51 - Posicionamento dos termopares para a medição.....	59
Figura 52 - Medição de temperatura na saída de água do motor .....	60
Figura 53 - Medição de temperatura da água de entrada no motor .....	60
Figura 54 - Pontos de entrada e saída de água do motor Stirling.....	61
Figura 55 - Sistema de circulação de água .....	61
Figura 56 - Esquema de ligação do medidor de vazão de gás.....	62
Figura 57 - Placa com arranjo de resistências de 47 W.....	63



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características geométricas do motor Genoa 03 .....	31
Tabela 2 - Anotação dos parâmetros medidos.....	64

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivo geral.....	14
1.3 Objetivos específicos.....	14
1.4 Organização do trabalho.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 A Máquina de Stirling.....	17
2.2 Aspectos Construtivos do motor Stirling.....	17
2.3 Funcionamento do Motor Stirling.....	19
2.4 Principais Tipos de Motores Stirling.....	22
2.4.1 Motor Stirling tipo Alfa.....	23
2.4.2 Motor Stirling tipo Beta.....	23
2.4.3 Motor Stirling tipo Gama.....	23
2.5 O uso didático do motor Stirling em instituições de ensino.....	24
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
3.1 Levantamento de dados e escolha do local.....	26
3.2 Conhecendo o motor Stirling.....	26
3.3 Descrição do gerador Stirling Genoa 03-2014.....	27
3.4 Detalhamento do motor Stirling.....	31
<b>4 COMISSONAMENTO DO MOTOR STIRLING.....</b>	<b>37</b>
4.1 Verificação mecânica do acoplamento moto/gerador.....	37
4.2 Usinagem da Flange.....	40

<b>5 BANCADA DE ENSAIOS.....</b>	<b>45</b>
5.1 Descrição da bancada de ensaio.....	45
5.1.1 Motor Stirling e gerador.....	45
5.1.2 Combustível utilizado.....	46
5.1.3 Sistema hidráulico para resfriamento.....	46
5.1.4 Sistema pneumático.....	46
5.1.5 Sistema elétrico.....	47
5.2 Preparação para o uso do motor Stirling.....	47
5.3 Proposta para realização de experimentos.....	50
5.4 Procedimentos para o funcionamento do motor Stirling.....	51
<b>6 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....</b>	<b>55</b>
6.1 Parte 1 - Acionamento.....	56
6.2 Parte 2 - Medições.....	57
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
<b>8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os maiores desafios do ensino estão ligados ao uso de metodologias relacionadas ao ensino, a partir do uso de recursos capazes de proporcionar o entendimento do conteúdo de forma mais relevante (MOREIRA, 2006).

O uso de didáticas inovadoras são ferramentas de estudo importantes para o aprendizado, pois, podem facilitar a interpretação de conteúdos complexos e estimular a lógica e a criatividade dos discentes.

Dentre os benefícios de incentivar as atividades práticas no processo de avaliação do ensino, Andrade e Massabni (2011) definem que a realização de projetos de caráter prático traz mais incentivos aos alunos, e conseqüentemente, o esforço maior gera melhores resultados no desenvolvimento das atividades. Dessa forma, disciplinas relacionadas com máquinas, motores, geração e cogeração de energia também proporcionariam um maior aprendizado pelos discentes com a realização de atividades práticas de laboratório e pesquisa (PILON *et al.*, 2012).

A definição de cogeração é tida como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma útil, com alta eficiência energética, pois não há desperdício de energia térmica, como ocorre nos sistemas termoelétricos puros (ODDONE, 2001).

O aproveitamento de maneira mais eficiente da energia dissipada de outros processos, bem como a otimização do gerenciamento dos recursos naturais, torna atrativa a possibilidade da utilização do motor de Stirling na geração de energia elétrica. Esta tecnologia foi desenvolvida e apresentada pelo escocês Robert Stirling, em 1816, com o objetivo de substituir os motores a vapor (BARROS, 2005).

Os motores Stirling podem ser aplicados em diversos sistemas na geração de energia elétrica, necessitando apenas de uma fonte de energia térmica. Toda essa diversidade se deve ao princípio de funcionamento do mesmo que é de combustão externa e se baseia em características geométricas e físicas, pois, seu tipo de fonte de trabalho consiste na troca de temperatura no trocador de calor, da queda de pressão, da perda de calor e demais variáveis.

Esse tipo de motor opera em velocidades de 33 Hz a 67 Hz, sua eficiência está compreendida entre 30% e 40%, e a temperatura do fluido de trabalho pode variar de 686°C a 800°C (SULZBACH, 2010).

O motor Stirling é uma das tecnologias de geração distribuída com maior possibilidade de crescimento em regiões isoladas, e podem operar com qualquer fonte de calor, incluindo a queima direta ou gaseificação da biomassa. Sendo a biomassa uma fonte de energia limpa e abundante, e pensando nos aspectos ambientais, essa tecnologia se faz muito promissora no âmbito de pesquisa em alternativas energéticas (SILVA *et al.*, 2009).

Muitas pesquisas foram feitas para o desenvolvimento de modelos e análise do desempenho, baseadas na termodinâmica, para o uso dos motores Stirling. São encontrados também estudos que envolvem protótipos caseiros, de baixo custo. Estudos com motores Stirling comerciais, em especial, para o uso em bancadas didáticas, para executar ensaios de cogeração de energia, são incipientes (GARCÍA *et al.*, 2018).

Segundo Cruz (2012): “Por necessitarem uma tolerância menor do que a requerida pelos motores de combustão interna no processo de fabricação, os motores Stirling demandavam atenção especial, isto aumentava o seu custo de fabricação”. Como na maioria das vezes a escolha é definida pelo fator financeiro, o custo ainda um dos motivos pelo qual os motores Stirling ainda serem pouco difundidos e utilizados, fazendo com que o preço para aquisição de modelos comerciais, com potencial de geração de energia, ainda seja alto.

### **1.1. Justificativa**

No contexto atual, verificando a necessidade cada vez maior de aumentar a capacidade de geração energética, principalmente através de tecnologias limpas, que não degradam o meio ambiente, uma tecnologia que possibilita o uso dos diversos tipos de combustíveis existentes, torna o modelo de funcionamento do motor Stirling mais atrativo para ser utilizado em novas pesquisas (PAULA, 2007).

A respeito das possibilidades de utilização de motores Stirling para a geração de energia elétrica, pode-se dizer que: “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”, é o que afirma Furtado e Noventa (2014).

O estudo dos princípios de funcionamento do equipamento traz oportunidades para que os alunos tenham conhecimento sobre tipos de sistemas de geração e cogeração, fazendo com que surjam ideias para o uso do motor Stirling, e conseqüentemente o surgimento de aplicações na geração de energia elétrica. A ideia central desta pesquisa consiste em desenvolver um método de realizar ensaios de forma didática, utilizando o gerador Stirling adquirido pela UFMS, e realizar alterações mecânicas para melhorar a eficiência e proporcionar uma plataforma experimental didática, com visualização das polias em movimento. O funcionamento desse tipo de motor pode ser de grande utilidade para os alunos e pesquisadores dos cursos de engenharias, realizando estudos para a geração de energia limpa.

A implementação de uma metodologia para auxiliar a realização de testes com o motor Stirling, com a elaboração de um roteiro prático de utilização do sistema, permitirá o desenvolvimento e aprimoramento de experimentos futuros pelos interessados no tema.

## **1.2. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma bancada de aula para ensaios de cogeração de energia elétrica, através do aproveitamento da energia térmica, utilizando o motor gerador Stirling.

## **1.3. Objetivos Específicos**

- Realizar uma revisão bibliográfica do ciclo Stirling;
- Fazer modificações para melhorar a utilização do motor Stirling e facilitar as medições;
- Elaborar um roteiro de experimentos utilizando o motor Stirling.

#### **1.4. Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado em seis capítulos como descrito a seguir:

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica dos conceitos, utilização e pesquisas sobre o motor Stirling.

No capítulo 3, materiais e métodos, é detalhado o motor Stirling, objeto deste estudo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados de comissionamento, melhorias, e desenvolvimento de procedimentos para o uso numa bancada didática. As conclusões do trabalho aparecem no capítulo 5 e as referências utilizadas estão no capítulo 6.

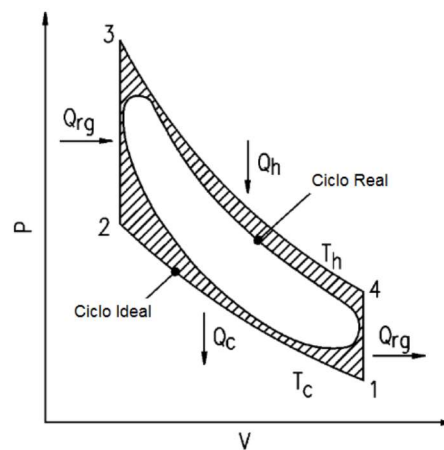
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O motor Stirling é uma máquina térmica que funciona com uma fonte externa de calor. Apesar desse motor ter sido inventado há mais de 200 anos, o mesmo ainda tem um custo de fabricação maior se comparado com os motores de combustão interna.

O Ciclo de Stirling é um Ciclo Termodinâmico que descreve o sistema de funcionamento geral dos Motores Stirling. A Figura 1 mostra o ciclo ideal e o ciclo real em um diagrama PV.

Semelhante ao Ciclo de Carnot, o ciclo teórico onde uma máquina térmica atinge sua máxima eficiência, possui estimativa real de eficiência térmica de aproximadamente 45% (VINEETH, 2011).

Figura 1. Ciclo real e ideal de um motor Stirling



Fonte: (CORRIA *et al.*, 2006)

O Ciclo teórico se divide em 4 fases distintas:

- Expansão isotérmica: Uma fonte de calor externa aquece o gás enquanto este se expande à temperatura constante.
- Resfriamento isocórico: O calor é retirado do gás a volume constante.
- Compressão isotérmica: O gás é refrigerado enquanto seu volume diminui, para que sua temperatura não aumente.

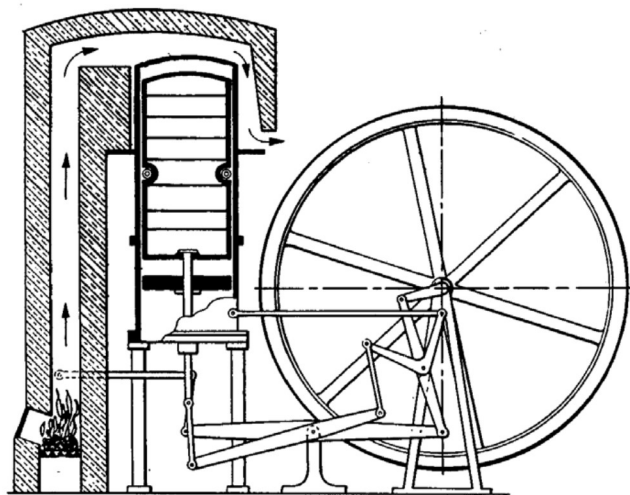


- Aquecimento isocórico: O gás é aquecido até a temperatura inicial, e o ciclo recomeça.

## 2.1. A Máquina de Stirling

O motor Stirling foi inventado pelo escocês Robert Stirling, em 1816, para que pudesse substituir os sistemas mais utilizados na época, baseados na máquina a vapor. Na Figura 2, pode ser observado o desenho da patente do primeiro modelo de motor Stirling construído. Esse motor fez sucesso por mais de 70 anos, até ser substituído pelos motores de ciclo Otto e Diesel, no início do ano de 1900 (MAJESKI, 2006).

Figura 2. Desenho da patente do motor Stirling de Robert Stirling



Fonte: (Pino, 2013 p. 12)

O motor de Stirling é um equipamento térmico que tem seu funcionamento em ciclo fechado. É também conhecido como motor de ar quente, por utilizar como fluido de trabalho os gases atmosféricos. Ele tem seu funcionamento através de uma fonte externa de calor, que pode ser qualquer combustível sólido, líquido ou gasoso (PULKRABEK, 2014).

## 2.2. Aspectos Construtivos do Motor de Stirling

Os Motores Stirling são compostos normalmente pelos seguintes componentes:

- **Regenerador:** este componente do motor é usado para “armazenar” o calor durante

o ciclo quente e devolver parte do calor ao gás durante o retorno do ciclo frio. A inclusão deste componente do motor Stirling aumenta o rendimento, pois, com o seu uso, o ciclo se torna mais próximo do teórico, fazendo com que a temperatura tenha menor variação durante os ciclos. O regenerador é um trocador de calor composto por tubos, metal poroso, ou finas placas de metal (aletas) que trocam calor com o gás.

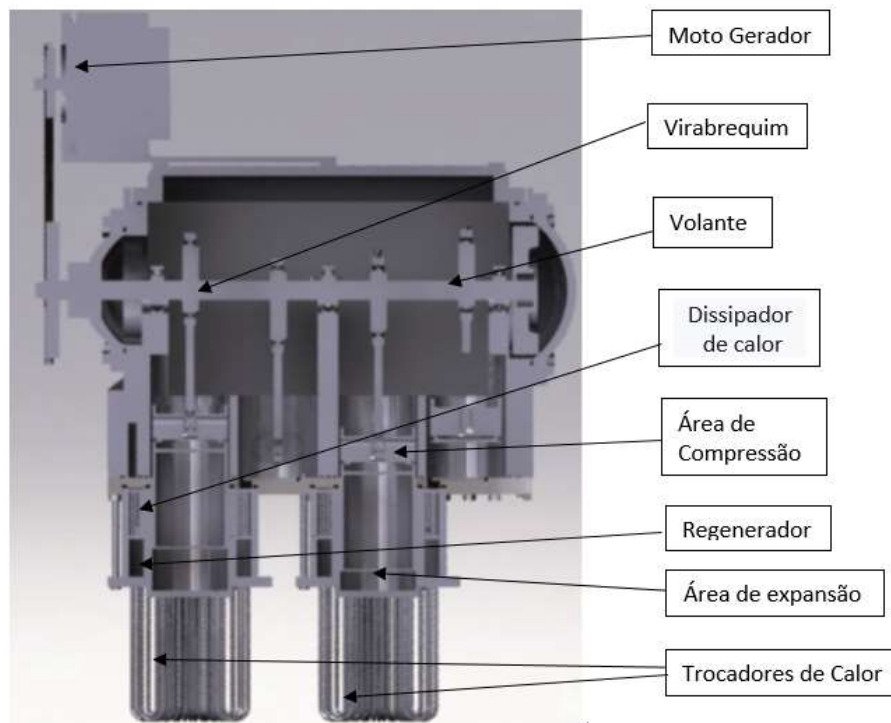
- **Fluido de trabalho:** vários tipos de gases podem ser utilizados. O gás é completamente isolado das partes móveis do motor, e devem ser consideradas as pressões ideais de trabalho, de cada tipo de gás.

- **Pistões:** na configuração mais simples de motor é utilizado dois pistões. O quente (Deslocador) e o frio (Pistão de Potência/Trabalho), e são ligados a um virabrequim ou um sistema de alavancas.

- **Aquecedor e Resfriador:** o aquecimento e o arrefecimento do gás devem ocorrer em partes distintas do ciclo.

Na Figura 3 temos uma visão em corte do motor Stirling Genoa 03.

Figura 3. Visão do motor Stirling Genoa 03 em corte



Fonte: Adaptado de Genoastirling (2014)

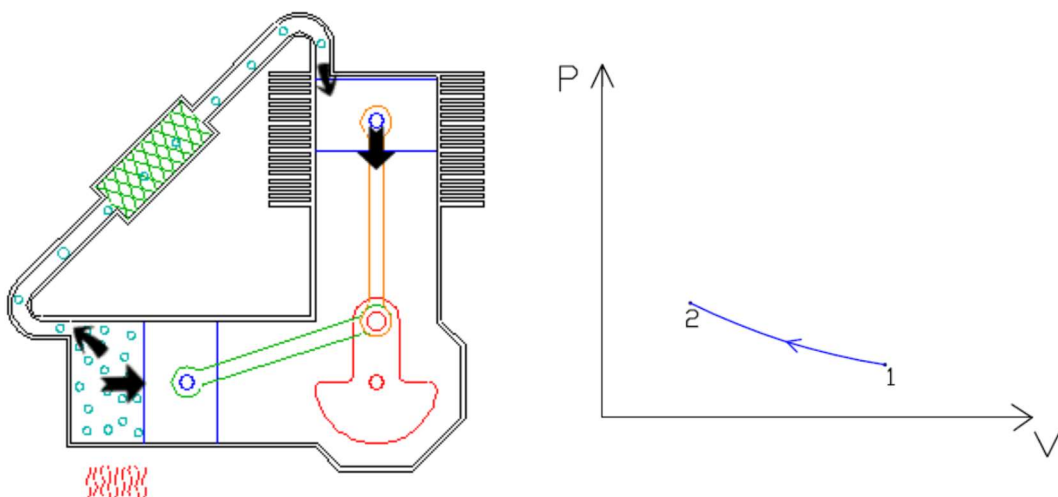
### 2.3. Funcionamento do Motor Stirling

O “ciclo” é composto por quatro processos termodinâmicos sequenciais (ciclo termodinâmico ideal). Cada fase do ciclo corresponde a uma transformação termodinâmica (processo) do fluido de trabalho (gás). Na realidade as fases não se processam isoladamente, o funcionamento aqui descrito é o teórico. Serão usadas as denominações: “pistão frio”, ou Pistão de Potência, para se designar o pistão do lado frio do motor da configuração já apresentada, e “pistão quente”, ou Pistão Deslocador, para o pistão do lado que trabalha com as temperaturas mais elevadas. As figuras representam a fase final da transformação.

#### 1 – 2 Compressão isotérmica (temperatura constante):

Neste processo, conforme a figura 4 ambos os pistões (compressão e expansão) se movem para cima, realizando trabalho de compressão sobre o fluido de trabalho, enquanto calor é rejeitado para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante;

Figura 4. Compressão em motor Stirling tipo Alfa

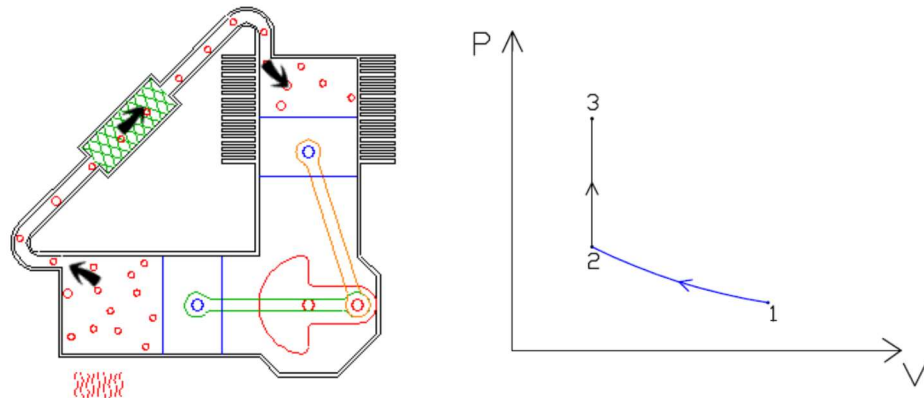


Fonte: (PEREIRA, 2012)

#### 2 – 3 Aquecimento isocórico (volume constante):

Conforme a Figura 5, o pistão de compressão vai até o ponto morto superior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para baixo. Com isso o fluido de trabalho passa para o espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa aumentando a pressão;

Figura 5. Aquecimento em motor Stirling tipo Alfa

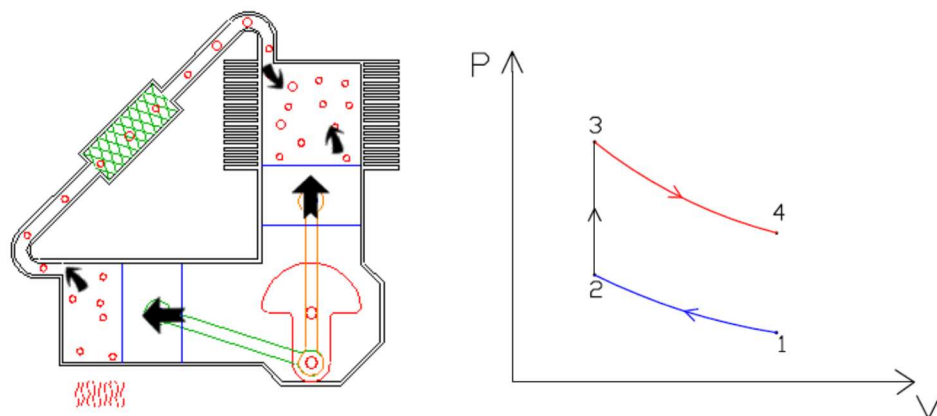


Fonte: (PEREIRA, 2012).

### 3 – 4 Expansão isotérmica (temperatura constante):

Neste processo, ambos os pistões (compressão e expansão) se movem para baixo, expandindo o fluido de trabalho e realizando trabalho. Na Figura 6 é mostrado como o processo é realizado a temperatura constante, sendo que durante a expansão, o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;

Figura 6. Expansão em motor Stirling tipo Alfa

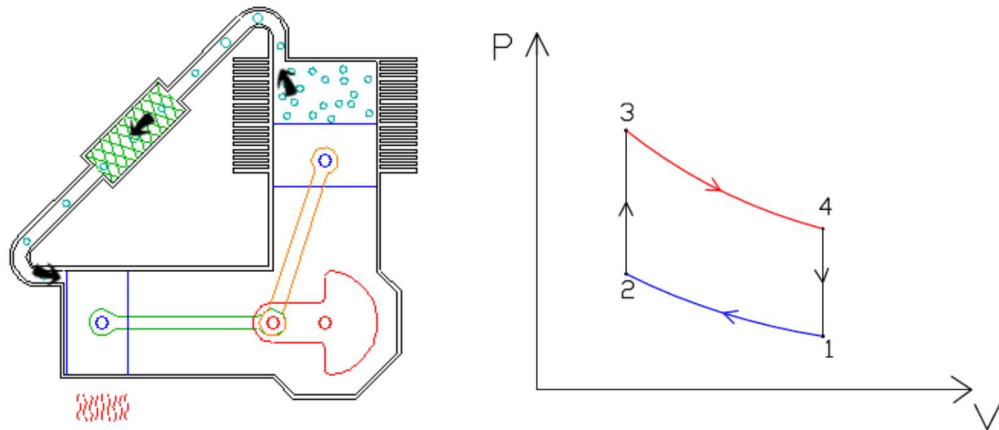


Fonte: (PEREIRA, 2012)

### 4 – 1 Resfriamento isocórico a volume constante:

O pistão de compressão se movimenta até o ponto morto inferior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para cima, conforme a Figura 7.

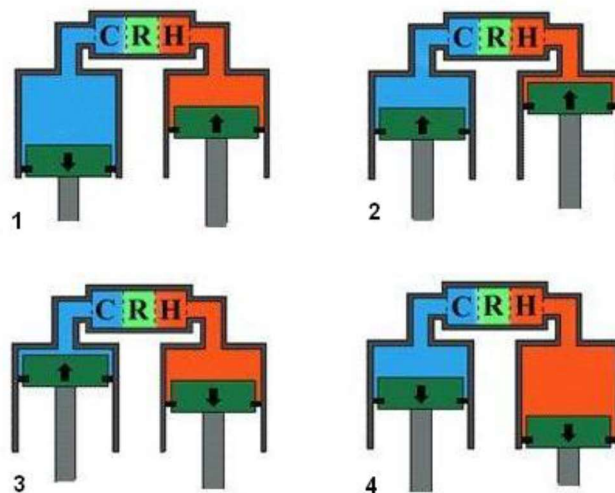
Figura 7. Rejeição de calor em motor Stirling tipo Alfa



Fonte: (PEREIRA, 2012)

Os motores Stirling só entram em funcionamento quando há uma diferença de temperatura entre o pistão frio e o quente, que irá causar dentro do motor, que tem seu ciclo totalmente fechado, uma expansão e uma retração do fluido de trabalho, gerando movimento. A Figura 8 expressa a sequência do ciclo para o motor Stirling tipo Alfa, que é do mesmo tipo do motor que será utilizado no protótipo deste projeto. É interessante observar a defasagem de  $90^\circ$  entre os pistões de compressão e de expansão.

Figura 8. Princípio de Funcionamento do Motor Stirling tipo Alfa



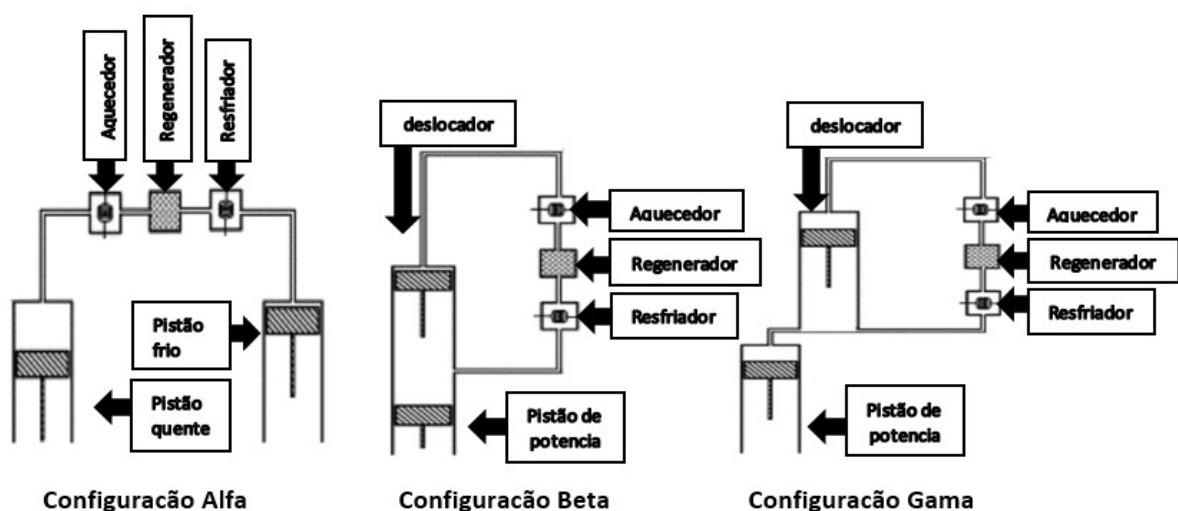
Fonte: (HIRATA, 1995)

Colocando um regenerador na ligação entre os cilindros frio e quente, é possível recuperar parte do calor quando o gás de trabalho flui do cilindro quente para o frio, possibilitando o reaquecimento quando o gás flui novamente para a parte quente. Um regenerador com uma efetividade de 100% permite que o calor que seria rejeitado durante o processo resfriamento isocórico  $4 \rightarrow 1$  seja usado como calor fornecido no processo de aquecimento a volume constante  $2 \rightarrow 3$ . Consequentemente, todo o calor fornecido ao fluido de trabalho de fontes externas ocorreria no processo de expansão isotérmica  $3 \rightarrow 4$  e todo o calor rejeitado para as vizinhanças ocorreria no processo de compressão isotérmica  $1 \rightarrow 2$ . Pode-se concluir, portanto, que a eficiência térmica do ciclo Stirling, neste caso, é dada pela mesma equação do ciclo de Carnot (MORAN e SHAPIRO, 2000).

#### 2.4. Principais Tipos de Motores Stirling

Ao longo dos anos, surgiram diferentes versões do motor Stirling (Figura 9). Os que são normalmente usados atualmente são do tipo alfa, que possuem um mecanismo mais simples. Já o beta e o gama têm projetos mecânicos mais complexos, tendo o seu custo diferenciado. Mas, todos compartilham do mesmo ciclo termodinâmico no funcionamento (KONGTRAGOOOL E WONGWISES, 2003).

Figura 9. Configuração motores Stirling



Fonte: Adaptada de (KONGTRAGOOOL E WONGWISES, 2003)

### 2.4.1 Motor Stirling Tipo Alfa

O Motor Stirling Tipo Alfa (Figura 10a) é composto por dois cilindros independentes. O pistão quente, também chamado de pistão deslocador, é responsável pela produção do movimento, devido à variação de pressão interna do sistema. O pistão frio, chamado de pistão de potência/trabalho, tem a função de comprimir e descomprimir o fluido de trabalho.

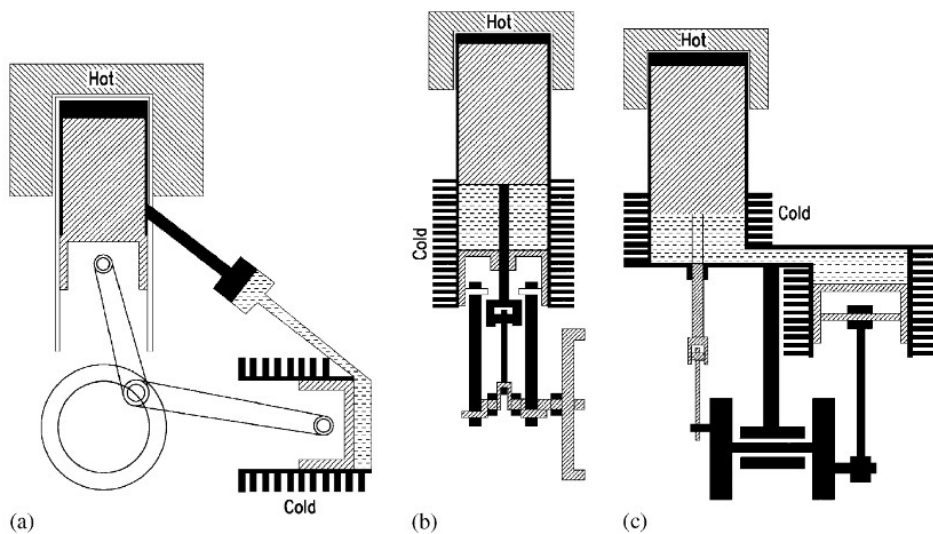
### 2.4.2 Motor Stirling Tipo Beta

O motor Stirling Tipo Beta (Figura 10b) é composto de apenas um cilindro com dois pistões em linha, um sobre o outro. O pistão interno (deslocador) faz o deslocamento do fluido de trabalho, e o pistão externo (potência) faz o trabalho e mantém confinado todo fluido no interior do motor.

### 2.4.3 Motor Stirling Tipo Gama

Como no tipo Alfa, o tipo Gama (Figura 10c) também possui dois cilindros independentes. O pistão deslocador faz o deslocamento do fluido de trabalho enviando até a câmara do pistão de potência (WAGNER, 2008).

Figura 10. Motores Stirling tipo alfa, beta e gama



Fonte: (CORRIA *et al.*, 2006)

## 2.5. O uso didático do motor Stirling em instituições de ensino

Os estudos desenvolvidos em torno do motor Stirling, direcionados ao ensino, podem ser divididos em dois tipos: os que utilizam protótipos de baixo custo ou “caseiros”, com finalidade exclusivamente educativa, de pequeno porte, e os que utilizam motores de médio e grande porte, que têm um projeto mais elaborado e capacidade de gerar energia elétrica para atender diversas cargas.

Moura (2016) evidenciou a viabilidade do uso do motor Stirling em turmas de segundo ano do Ensino Médio para aprender termodinâmica. Ficou demonstrado que os alunos, em grupos, são capazes de construir o motor Stirling caseiro tipo gama a partir do material desenvolvido no trabalho. Outras pesquisas, como as de Saraiva (2016) e Vicari (2018), seguem a mesma linha de aplicação, estimulando o aprendizado dos alunos em escolas do ensino médio.

Pesquisas realizadas em faculdades de engenharia, utilizando motores Stirling de pequeno porte (PAUTZ, 2013), voltadas para estudantes de graduação, são observadas nos trabalhos de Costa *et al.* (2021), que desenvolveu uma bancada com um projeto simples e de fácil manuseio de um motor Stirling tipo gama, e Dias (2016), que além de um protótipo, desenvolveu um programa digital que permite calcular grandezas como potência de saída e rendimento. Allen *et al.* (2002) mostra que os alunos do curso de engenharia mecânica, com o desenvolvimento do projeto do motor Stirling em laboratório, se envolveram mais nas aulas, gerou um grande interesse e reduziu a evasão escolar. Também utilizado na pós-graduação, desenvolveram-se uma série de experimentos pós-montagem do motor, abordando considerações financeiras, experiência de fabricação e considerações analíticas e de laboratório, servindo como uma estrutura para discutir tópicos fundamentais de engenharia, incluindo termodinâmica, mecânica de materiais, seleção de materiais, dinâmica de máquinas, vibrações e acabamento superficial.

Estudos com motores de médio e grande porte são relatados nos trabalhos de Barros (2005), que faz uma avaliação teórica e experimental do motor Stirling Solo 161, operando com diferentes combustíveis, na Universidade Federal de Itajubá, e Paula (2007), que aprofunda esses estudos para a geração de eletricidade a partir do uso da biomassa, e



apresenta o projeto e construção de um protótipo de um outro motor Stirling denominado Amazon, para regiões isoladas, e com potência esperada de 8 kW.

Metodologias que permitem projetar, caracterizar e prever o desempenho de motores Stirling, usando os conceitos disponíveis na literatura para a determinação dos parâmetros geométricos de projeto, são apresentados nos trabalhos de Braga (2018), Caetano (2019) e Dullius (2019). Eles apresentam contribuições no desenvolvimento dos motores Stirling, uma vez que as metodologias desenvolvidas eliminam a necessidade de se obter parâmetros de forma experimental e permite que previsões de desempenho sejam obtidas a partir de um protótipo simples, para diferentes condições de operação.

Fagerheim (2022) criou um programa de análise modificável e expansível para motores Stirling, que pode ser usado para fins educacionais. Para conseguir isso, o programa permite que o usuário insira os dados de entrada usados para a análise de Schmidt e análise adiabática. Os resultados são então visualizados através de gráficos com marcadores que são sincronizados com uma animação do ciclo Stirling. Isso é útil para usuários não familiarizados com o ciclo Stirling, permitindo uma análise ou revisão para confirmar a validade dos resultados.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma proposta metodológica, de caráter exploratória, para o desenvolvimento de ensaios, para o estudo da geração e cogeração de energia, utilizando o motor Stirling adquirido pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) no ano de 2015. Para permitir o uso, com finalidade educacional, em uma bancada de ensaio, será feita uma avaliação completa do sistema, e serão implementadas as alterações necessárias para a atualização do sistema. Por fim, será montado um roteiro de funcionamento, para que o sistema possa ser utilizado como plataforma didática de geração e cogeração de energia elétrica, na faculdade de engenharia da Universidade.

O desenvolvimento experimental envolverá, portanto, um estudo aprofundado sobre o princípio de funcionamento do motor, alterações de melhoria no sistema, e propostas de estudo e testes a serem realizados para o aprendizado dos alunos.

Nesse sentido, os resultados serão apresentados de forma qualitativa, a partir da coleta de informações de fontes secundárias, incluindo revisão bibliográfica. Como fontes de pesquisa, a fim de colher o referencial teórico, serão utilizados livros, artigos e sites relacionados ao tema.

#### **3.1 Levantamento dos dados e local de desenvolvimento.**

Os dados iniciais para a execução deste trabalho serão obtidos através de pesquisa bibliográfica. Toda a pesquisa e desenvolvimento da metodologia, e melhorias mecânicas do equipamento será realizada nas dependências do laboratório de eletrônica de potência (BATLAB), localizado no campus Cidade Universitária, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), onde se encontra o motor Stirling utilizado no projeto.

#### **3.2 Conhecendo o motor Stirling.**

O motor Stirling utilizado neste trabalho foi adquirido em 2014, com recursos do CNPq, pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, da empresa italiana Genoastirling S.R.L., sendo recebido pela instituição em dezembro de 2015. Ele fazia parte de um projeto, cujo

objetivo inicial era fazer o estudo de viabilidade para a instalação do sistema em indústrias ceramistas no estado de Mato Grosso do Sul, para estudos de cogeração de energia (HAYASHI, 2019).

Este equipamento, durante o ano de 2016, ficou sendo testado por alunos de iniciação científica, que tiveram dificuldade em operar a máquina, mesmo com orientação. O equipamento foi desmontado em 2017 para verificação mecânica, para que o mesmo fosse usado no projeto de conclusão de curso de Hayashi (2019).

Durante o processo de desmontagem, verificou-se que algumas peças estavam com travamento em suas partes móveis. Após sanar estes problemas, com recursos técnicos locais e serviços de usinagem, o equipamento foi montado, e no início de 2018 deu-se continuação ao procedimento *Break-in* da máquina, que consiste no funcionamento mecânico do equipamento aplicando uma tensão contínua (DC) no gerador, que funcionava como um motor, produzindo energia mecânica no eixo do motor Stirling. *Break-in* é o nome que se dá ao processo de amaciamento das peças do sistema mecânico, para diminuir o atrito entre elas.

Após os procedimentos para ativar o equipamento, conforme orientação do fabricante, foi iniciado a montagem para os testes e coleta de dados e medições. O equipamento funcionou novamente, ainda no ano de 2018, mas, não alcançou a potência de geração esperada, e também apresentou vazamentos de fluido de trabalho.

### **3.3 Descrição do gerador Stirling Genoa 03-2014.**

Os itens que fazem parte do pacote do motor Stirling adquirido pela UFMS/BATLAB, que serão utilizados na execução do trabalho são:

01 Motor *Stirling* do tipo alfa com 4 cilindros, modelo GE03-0014 (Figura 11);

Figura 11. Protótipo Motor Stirling modelo GE03-0014



Fonte: Autoria Própria

01 Moto gerador DC marca Drive Systems potência 3 kVA (Figura 12);

Figura 12. Moto gerador DC



Fonte: Autoria Própria

01 unidade controladora com 4 sensores termopares (Figura 13) e 1 sensor de pressão;

Figura 13. Unidade de controle de sensores e interface



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.17)

01 unidade Sensor série HPS-C (Figura 14) para medir a pressão do cilindro do Motor;

Figura 14. Conector do sensor de pressão HPS-C



Fonte: Autoria Própria.

01 suporte para motor Stirling e unidade de combustão (Figura 15);

Figura 15. Suporte para máquina e forno para combustão



Fonte: Autoria Própria

02 unidades de mangueiras com bicos de cerâmica e reguladores de pressão para gás GLP (Figura 16);

Figura 16. Mangueira para gás GLP, com bico de cerâmica e regular de pressão



Fonte: Autoria Própria

01 unidade de sistema de refrigeração, com bomba de circulação de 0,75cv e radiador (Figura 17);

Figura 17. Radiador para refrigeração e bomba de circulação



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.38)

01 unidade de reservatório para circulação de água, com capacidade de 300 litros (Figura 18);

Figura 18. Reservatório de água



Fonte: Autoria Própria

As características geométricas do motor Genoa 03 podem ser observadas na Tabela 01.

Tabela 1. Características geométricas do motor Genoa 03

PARÂMETROS	UNIDADES	VALOR
Comprimento da biela	l (mm)	210,0
Raio de rotação da biela	r(mm)	30
Diâmetro do cilindro	d (mm)	110,0
Curso do cilindro	s (mm)	55,2
Volume morto do cilindro de compressão	(cm <sup>3</sup> )	153,2
Deslocamento do cilindro de compressão	(cm <sup>3</sup> )	524,6
Expansão do cilindro de volume morto	(cm <sup>3</sup> )	153,2
Cilindro de expansão de deslocamento	(cm <sup>3</sup> )	524,6
Ciclo de expansão de compressão de deslocamento	( $\alpha^\circ$ )	90
<b>CARACTERÍSTICAS DO AQUECEDOR</b>		
Tipo trocador de carcaças e tubos, uma passagem por tubo de ar e outra por invólucro de água.		
Número de tubos	(Und)	48
Comprimento característico dos tubos	(mm)	393
Diâmetro hidráulico dos tubos	(mm)	3,00
Área de fluxo livre	(cm <sup>2</sup> )	3,39
Área molhada	(cm <sup>2</sup> )	1777,89
Volume total VH	(cm <sup>3</sup> )	133,34
<b>CARACTERÍSTICAS DO REFRIGERADOR</b>		
Tipo banco de tubos em U.		
Numero de tubos	48	216
Comprimento característico dos tubos	(mm)	65,5
Diâmetro hidráulico dos tubos	(mm)	2,00
Área de fluxo livre	(cm <sup>2</sup> )	6,79
Área molhada	(cm <sup>2</sup> )	888,95

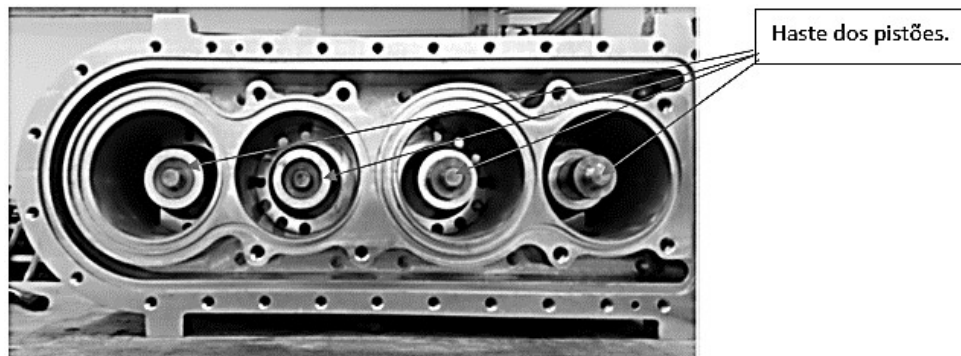
Fonte: Genoa 03 (2014, p.2)

### 3.4 Detalhamento do motor Stirling

Para melhor visualização e entendimento do sistema de funcionamento do motor Stirling Genoa 03, segue o detalhamento dos principais componentes do mesmo:

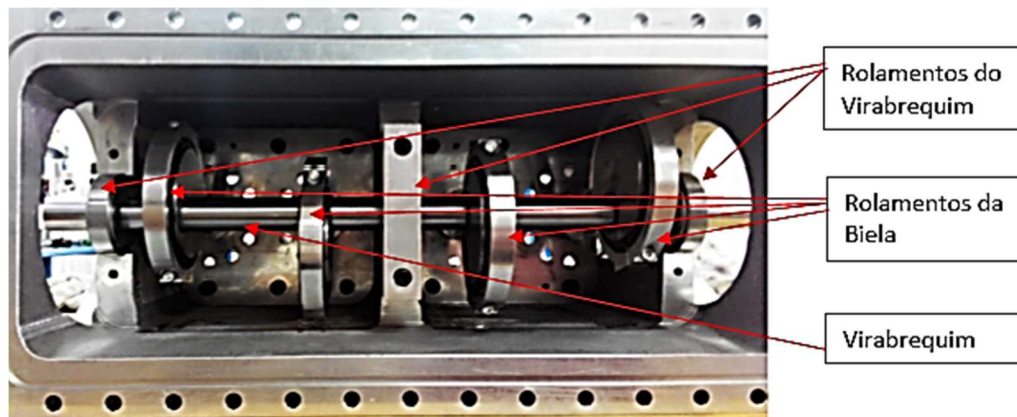
- Virabrequim e mecanismos de manivela (Figuras 19 a 22).

Figura 19. Localização das hastes dos pistões no bloco do motor



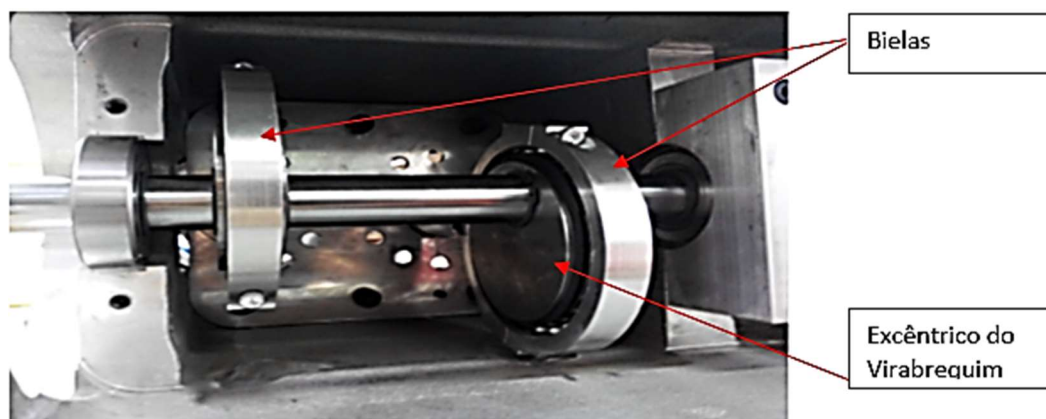
Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.4)

Figura 20. Virabrequim e rolamentos da biela



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.4)

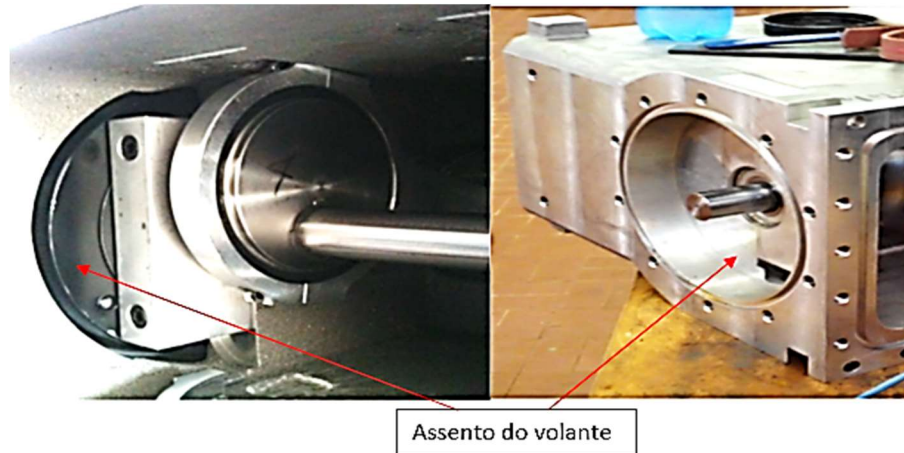
Figura 21. Excêntrico do virabrequim e bielas



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.4)



Figura 22. Assento do volante - vista interna e externa ao bloco

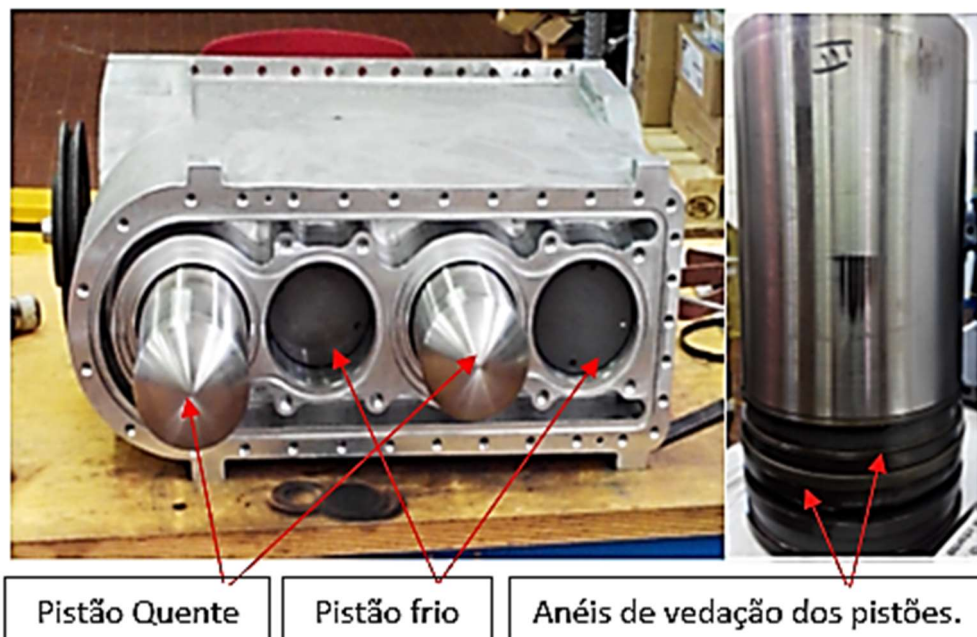


Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.5)

- Pistões

O primeiro e o terceiro pistão (da esquerda para a direita) são os pistões dos cilindros quentes, ou pistões deslocadores, e têm uma extensão em aço. O segundo e o quarto pistão são os pistões dos cilindros frios, também conhecidos como pistões de trabalho, conforme a Figura 23.

Figura 23. Bloco com pistões e anéis de vedação

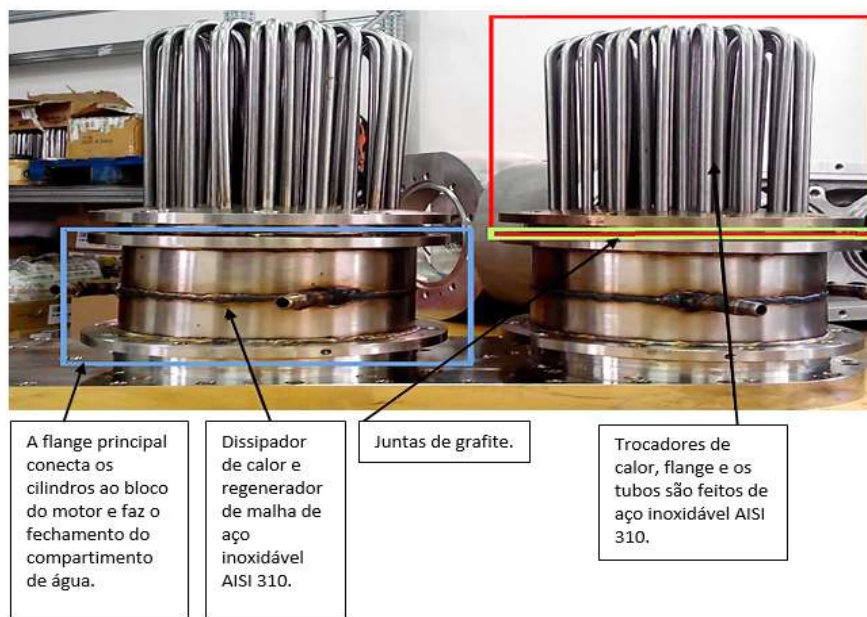


Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.5)

- Flange e Cilindros

Na Figura 24 é possível observar, de forma detalhada, os dissipadores de calor do motor Stirling Genoa 03, com seus respectivos tubos, para o sistema de circulação de água, que faz a refrigeração da parte fria do cilindro. Na parte superior, pode ser visto os trocadores de calor, que são feitos de tubos de aço inox AISI 310, e tem como característica o alto teor de cromo e níquel, resistente a corrosão, especialmente para o uso em altas temperaturas.

Figura 24. Trocadores de calor e dissipadores de calor



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.6)

Dentro dos dissipadores de calor existe uma serpentina de aço inox, Figura 25, que conduz o fluxo de água e garante o resfriamento do sistema.

Figura 25. Dissipador de calor desmontado

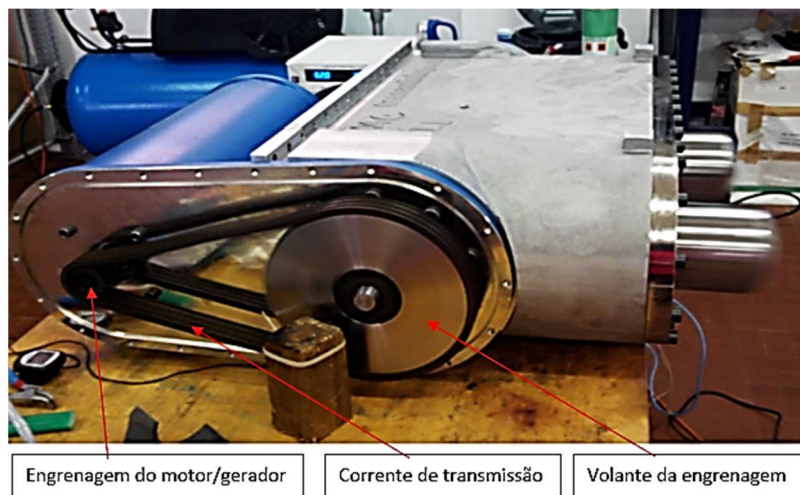


Fonte: Adaptada de Genoastirling (2014)

- Motor gerador acoplado ao motor Stirling.

O motor gerador pode ser usado como motor de partida, utilizando uma fonte de corrente contínua com 80 volts e aproximadamente 1500 Watts, conforme pode-se observar na Figura 26.

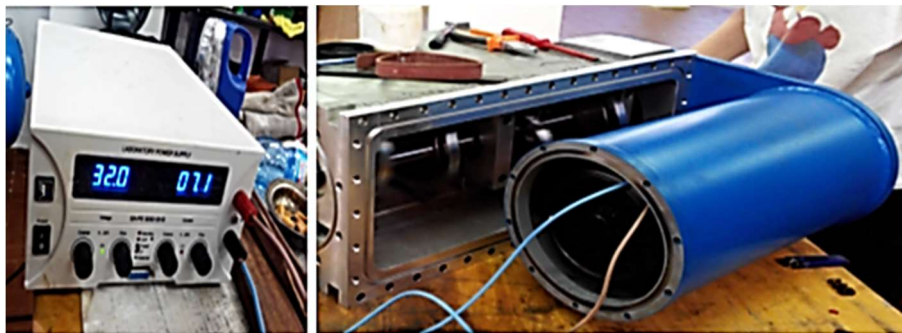
Figura 26. Motor Stirling conectado ao motor gerador



Fonte: Adaptada de Genoastirling (2014)

Para fazer o acionamento do motor gerador (Figura 27), deve ser utilizada uma fonte de tensão de corrente contínua, fazendo com que o gerador funcione como um motor de arranque, acionando o motor Stirling, até que o mesmo inicie seu ciclo de funcionamento. O início do ciclo poderá ser notado quando a corrente consumida pelo motor começar a diminuir, sinalizando que o motor Stirling está entrando em funcionamento. Nesse momento é retirada a fonte de alimentação e o motor gerador começa a gerar energia elétrica.

Figura 27. Motor Stirling e fonte DC conectado ao motor gerador

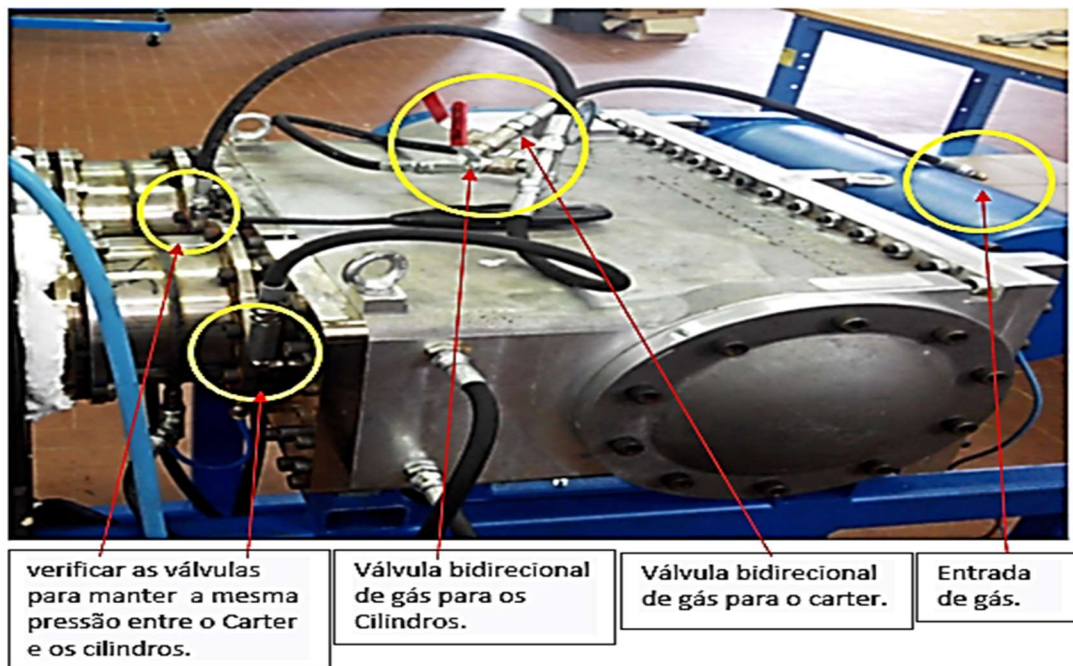


Fonte: Adaptada de Genoastirling (2014)

- Circuito de gás

Para o funcionamento dos motores Stirling, sempre irá existir um gás de trabalho confinado em seu interior, também chamado de fluido de trabalho. Na Figura 28, podem ser vistos os pontos de entrada do gás e suas respectivas válvulas.

Figura 28. Tubulações de entrada do gás de trabalho



Fonte: Adaptada de Genoastirling (2014)

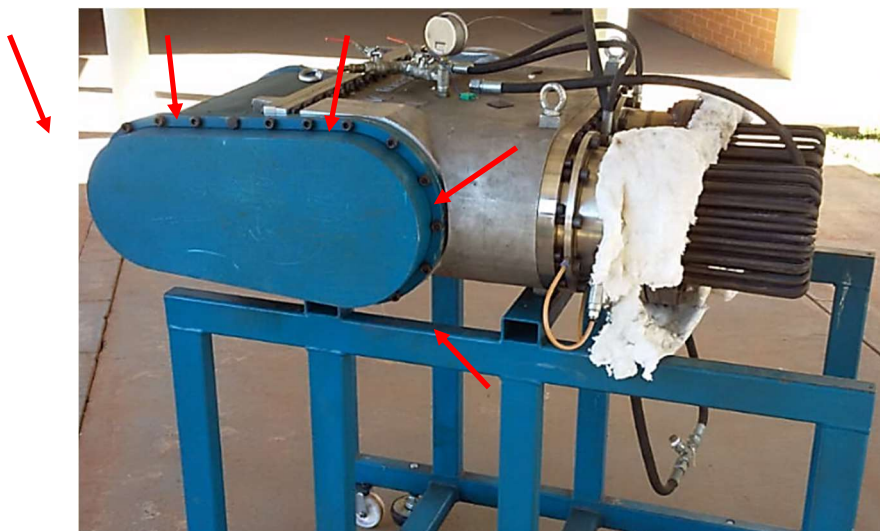
## 4. COMISSONAMENTO DO MOTOR STIRLING

### 4.1. Verificação mecânica do acoplamento motor/gerador.

Para que o protótipo possa funcionar de maneira mais eficiente, é necessário que os problemas relatados nos testes de funcionamento, no trabalho de Hayashi (2019), sejam solucionados, ou minimizados.

Um dos problemas existentes era o vazamento de pressão (gás de trabalho). Na junção entre o gerador e o motor Stirling, onde a tampa é fixada por diversos parafusos, como pode ser visto na Figura 29, é um local suscetível a vazamentos. O gerador original do motor Stirling Genoa 03, tem suas engrenagens de acionamento todas embutidas, deixando o operador sem um contato visual com o sistema, que é formado por duas engrenagens entre o motor e o gerador, impossibilitando o operador de monitorar ou aferir a rotação do mesmo, de maneira instantânea.

Figura 29. Motor Stirling Genoa 03 com a tampa de pressurização



Fonte: Autoria Própria

A tampa, que tem a função de vedar a pressão do sistema motriz entre motor Stirling e o gerador, é fixada por 23 parafusos. A vedação da mesma é feita por um anel de borracha. Da forma como está montado, não é possível fazer a troca do gerador por outro, ou modificar o sistema de acionamento. Na Figura 30, pode-se observar o motor sem a tampa de

pressurização, e pode ser visto o anel de borracha responsável pela vedação.

Figura 30. Motor Stirling Genoa 03 sem a tampa de pressurização



Fonte: Autoria Própria

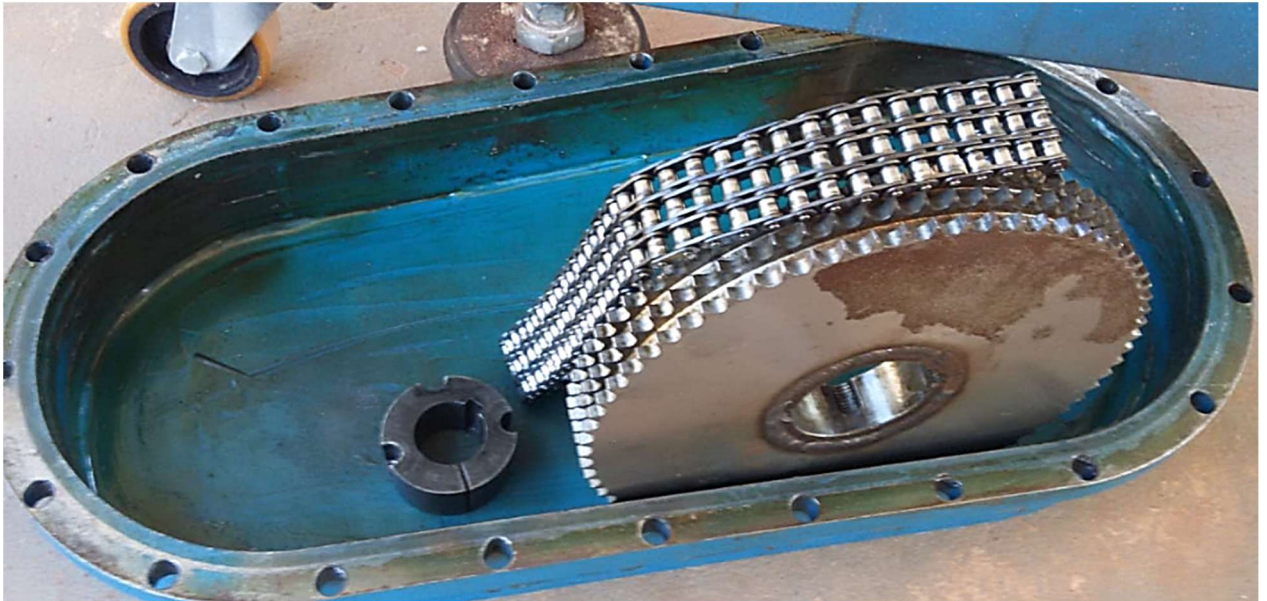
Pode-se notar na Figura 31, que o eixo do motor Stirling não tem uma chave para o travamento da polia no eixo do motor. Conforme em Hayashi (2019), o seu travamento é feito apenas por pressão no eixo, através de uma bucha excêntrica, e que durante alguns testes foi notado o eixo girava sem o giro da polia dentada. A usinagem do eixo para a colocação da chave e a mudança da transmissão de corrente para correia de borracha, fazem parte das modificações a serem executadas, trazendo mais flexibilidade, menos vibração e ruído ao protótipo na bancada. A tampa e a coroa do motor, retiradas, podem ser observadas com mais detalhes na Figura 32.

Figura 31. Motor Stirling Genoa 03 sem a corrente e a coroa da transmissão



Fonte: Autoria Própria

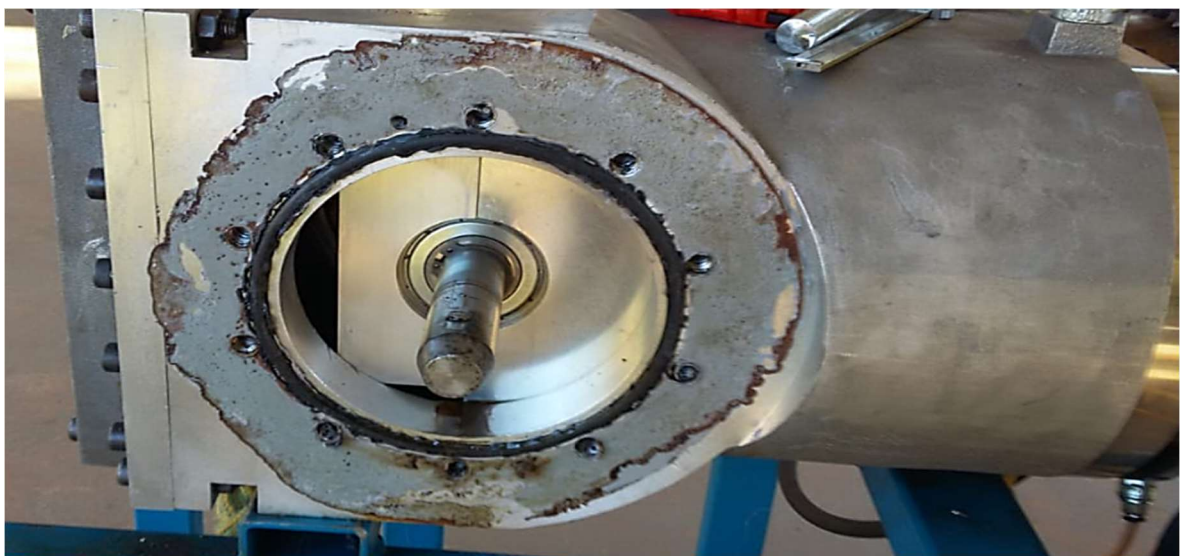
Figura 32. Tampa e a coroa da transmissão do motor Stirling Genoa 03



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 33, pode-se observar a frente do eixo do virabrequim. Esse é o local onde serão feitas as medições para a usinagem da flange com retentor para alta pressão e rolamento, para a posterior instalação do novo sistema de transmissão, que é uma das melhorias identificadas e propostas para este sistema.

Figura 33. Eixo do virabrequim do Motor Stirling Genoa 03



Fonte: Autoria Própria

## 4.2. Usinagem da Flange

Para a usinagem da flange foram feitas e verificadas várias medições, conforme a Figura 34. O encaixe de todas as peças dever ser perfeito, para que não haja travamento, nem folgas, nem vazamentos.

Figura 34. Verificações das medidas para a usinagem



Fonte: Autoria Própria

Foi adquirido uma peça de aço 4140, com 240 mm de diâmetro, por 40 mm de espessura (Figura 35), para fazer a usinagem da flange do motor Stirling e permitir eliminar o suporte do gerador, e a tampa pressurizada, que representava uma fonte de vazamentos de ar, eliminando vários pontos de vedação duvidosa. Com isso, espera-se uma melhor estabilidade da pressão interna do sistema.

Figura 35. Tarugo de aço Sae 4140



Fonte: Autoria Própria



A peça, já usinada, foi instalada no motor Stirling (Figura 36), não apresentando erros nas medidas, nem na usinagem. Feito isso, o próximo passo foi instalar um retentor bilabial para pressões de até (160 Psi), no lado interno da flange, para fazer a devida vedação. Para dar mais estabilidade e proteger o retentor das vibrações causadas pela rotação no eixo do motor, foi instalador um rolamento no lado externo.

Figura 36. Instalação para teste de medida do flange usinada



Fonte: Autoria Própria

Após a verificação da flange, observou-se que as roscas de fixação do bloco do motor Stirling estavam, quase todas, com o passe da rosca danificada, possivelmente causado pela colocação de parafusos diferentes do especificado, pelo excesso de aperto, ou pelo força aplicada, visto que anteriormente o suporte do gerador DC descarregava todo o peso do gerador no suporte que estava fixado nesta base. Para auxiliar a instalação, e dar uma sobre vida nas roscas do bloco do motor, as roscas foram limpas, e foi passado um abridor de roscas na medida correta (Figura 37), e foram trocados os 10 parafusos, de acordo com as medidas do fabricante, para dar linearidade ao aperto.

Figura 37. Abertura da rosca do bloco



Fonte: Autoria Própria

Como não havia a possibilidade de enviar o equipamento até a tornearia para a usinagem do eixo e para a colocação de chaveta, a mesma foi feita no local, de forma artesanal (Figura 38). Com isso, não há mais o risco de a polia girar e ocorrer a perda de tração no gerador, causando a paralização da geração ou da cogeração, durante os experimentos na bancada experimental.

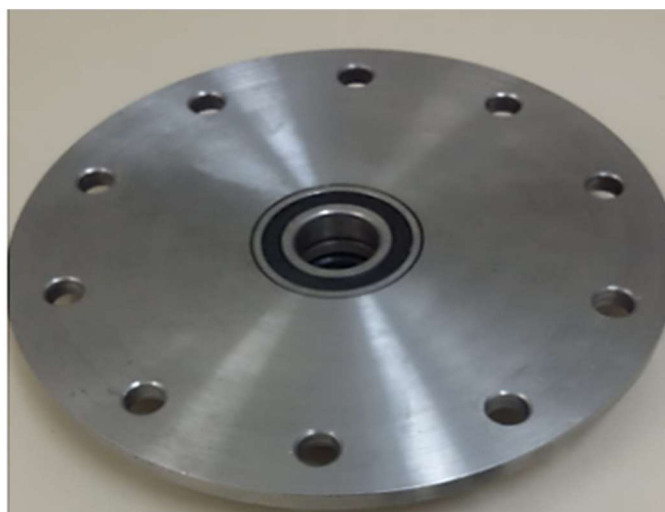
Figura 38. Usinagem do eixo do motor para o uso de chaveta



Fonte: Autoria Própria

Após a conferência das medidas e tolerâncias, o retentor e o rolamento foram instalados na flange, conforme ilustrado na Figura 39.

Figura 39. Flange pronta para a instalação



Fonte: Autoria Própria

Após a limpeza e conferência do passo e profundidade das roscas do motor Stirling, foi instalado um novo anel de vedação, deixando a base do motor (Figura 40) pronta para receber a flange, a nova tampa do eixo do virabrequim.

Figura 40. Base do motor Stirling pronta para a instalação da flange



Fonte: Autoria Própria

Com a flange instalada no motor Stirling (Figura 41), a próxima etapa é a instalação das novas polias para o acoplamento do motor ao gerador, que será através de correia de borracha, que possibilitará mais flexibilidade ao acionamento, gerando menos vibração que o sistema original, que era feito por corrente e engrenagens.

Figura 41. Flange instalada no motor Stirling, com a chave no eixo pronta para a instalação da polia



Fonte: Autoria Própria

A alteração do sistema de pressurização que envolvia a engrenagem de ligação, entre o motor Stirling e o gerador, teve como finalidade diminuir as áreas de vedação entre as peças, devido ao alto índice de vazamentos de gás de trabalho verificado em testes anteriores com o sistema, e também para que a roda de inércia do motor ficasse visível durante o seu funcionamento, facilitando a aferição da rotação e visualização do ciclo de funcionamento do motor, para o uso em experimentos didáticos.

As polias, com canal de perfil tipo B (Figura 42), para o acionamento do gerador foram usinadas em alumínio. É pretendido que essa mudança traga mais visibilidade aos ensaios com o motor, pois será possível verificar o movimento das polias durante os ciclos de funcionamento, possibilitando a medição da rotação instantânea, antes impossibilitada devido às partes móveis do motor e gerador ficarem todas dentro do módulo pressurizado.

Figura 42. Polia canal B do motor e gerador



Fonte: Autoria Própria

## 5. BANCADA DE ENSAIOS

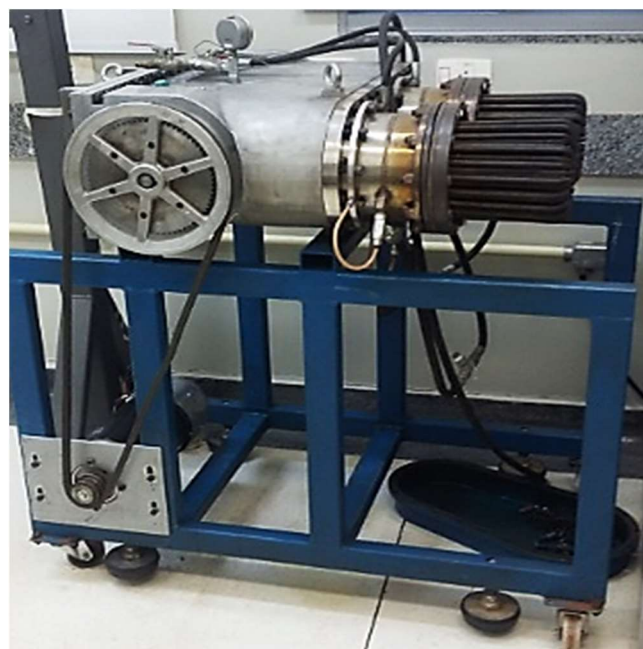
### 5.1. Descrição da bancada de ensaios

#### 5.1.1. Motor Stirling e gerador

O motor Stirling tipo alfa, marca Genoa Stirling, modelo Genoa 03, foi montado com um motor gerador de corrente contínua, marca Drive Systems, com potência de 3 kVA, devidamente instalado na parte inferior da estrutura de suporte do motor Stirling, e conectado mecanicamente através de uma correia de borracha de perfil em “V” e canal tipo B, conforme a Figura 43. Esse novo posicionamento do motor gerador dá mais flexibilidade ao sistema, permitindo a substituição por outros geradores, de tipo, tamanho e potência diferentes.

O protótipo está preparado para operar com gás liquefeito de petróleo (GLP). Os instrumentos de medição de grandezas, deverão ser instalados externamente ao equipamento, pois o mesmo não possui sistemas de medição instalados diretamente no motor.

Figura 43. Motor Stirling Genoa 03 com melhorias no acoplamento



Fonte: Autoria Própria

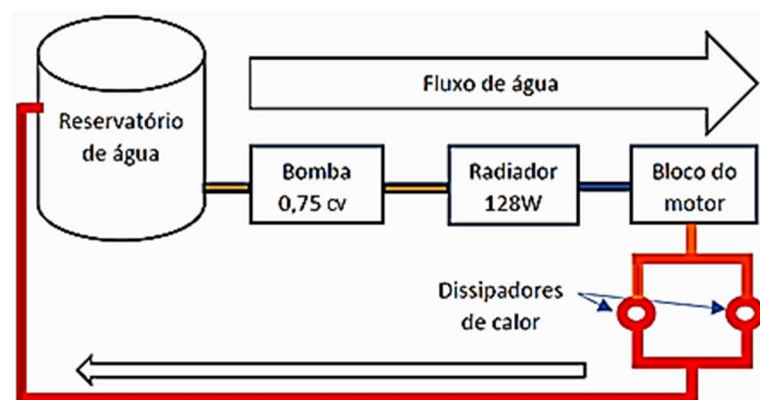
### 5.1.2. Combustível utilizado.

A alimentação do combustível é feita através de duas linhas, com dois queimadores, conectadas a dois reservatórios externos de 13 quilos de gás GLP. Estas duas linhas de gás são conectadas, cada uma, a uma válvula de regulagem de pressão e de vazão.

### 5.1.3. Sistema hidráulico para resfriamento.

O circuito externo da água de resfriamento do motor, consiste de um reservatório de água, com capacidade de 300 litros, e uma bomba com potência de 0,75 cv, que faz a água circular pelo motor Stirling, e de um trocador de calor horizontal tipo radiador, que reduz a temperatura do fluxo de água que retorna ao reservatório. O esquema hidráulico pode ser visto na Figura 44.

Figura 44. Fluxo do sistema hidráulico



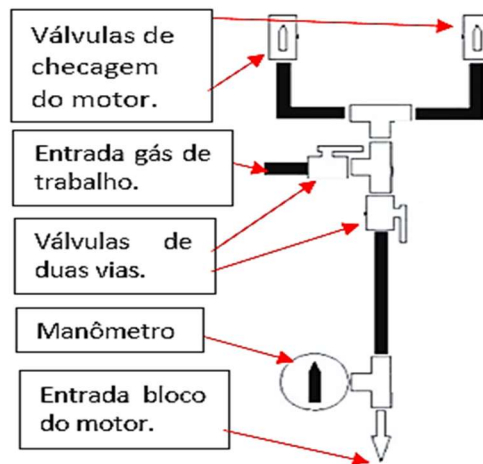
Fonte: Autoria própria

### 5.1.4. Sistema pneumático.

Como o fluido de trabalho a ser utilizado será o próprio ar (Figura 45), para que o mesmo possa ser injetado dentro do motor Stirling, deverá ser utilizado um compressor de ar que consiga chegar a pressão de pelo menos 140 Psi (9,65 Bar). O ideal seria trabalhar com a pressão que o fabricante indica como pressão de trabalho, aproximadamente 25 Bar, que seria equivalente a 360 Psi, para gerar 3 kVA, mas, como o objetivo do uso do equipamento é

didático, não é necessário, e nem seguro, trabalhar com pressões muito altas, dadas as modificações realizadas, e a instalação de um retentor que suporta no máximo 160 Psi. Para esta finalidade, uma pressão de 140 Psi é mais do que suficiente para a realização dos ensaios.

Figura 45. Ligações do sistema pneumático



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.9)

### 5.1.5. Sistema elétrico.

A colocação em funcionamento do motor gerador de corrente contínua, fazendo girar o motor Stirling Genoa 03, pode ser efetuado de duas maneiras:

1. Pode ser utilizada uma fonte de corrente contínua de 80 volts, 50 ampères e 1500 watts;
2. Pode ser montada uma ponte retificadora de onda completa, utilizando como fonte de tensão um regulador de tensão (Variac).

### 5.2. Preparação para o uso do motor Stirling.

É esperado que os alunos tenham pouco ou nenhum conhecimento prévio relacionado aos motores Stirling, antes de ter contato com o equipamento. Os professores que irão realizar os ensaios e exercícios utilizando o gerador Stirling, podem sugerir aos alunos a leitura prévia deste trabalho ou elaborar um resumo, antes de apresentar o motor Stirling pela primeira vez.

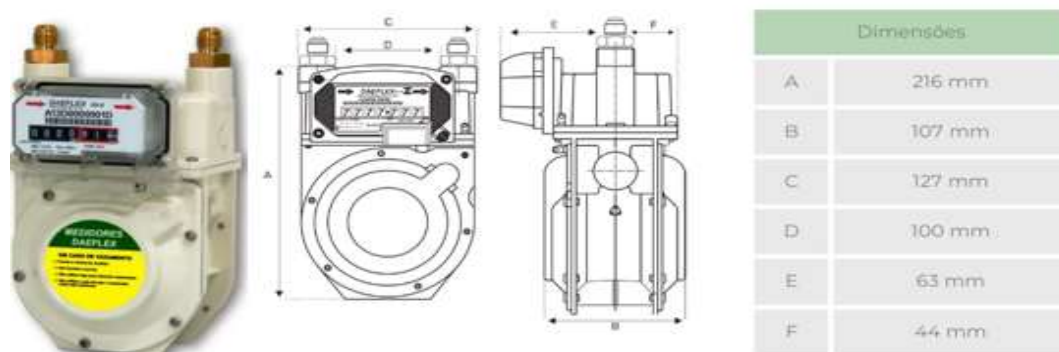
A profundidade e a avaliação da pesquisa a ser executada fica a critério do professor ou responsável técnico.

A instrumentação recomendada para a realização dos experimentos com o motor Stirling é a seguinte:

- Medidor de gás.

O medidor de gás será utilizado no experimento para medir o consumo de combustível do motor. Esse medidor pode ser do tipo volumétrico, por diafragma, conforme a Figura 46;

Figura 46. Medidor de vazão de gás



Fonte: (DAEFLEX, 2022)

- Medidor de vazão de água.

Poderá ser usado um medidor eletrônico para medir a vazão da água de resfriamento do motor Stirling, Figura 47. Em sistemas sem ajuste de velocidade, pode-se adicionar um inversor de frequência para fazer o ajuste de rotação na bomba.

Figura 47. Medidor fluxo digital



Fonte: Autoria própria



- Termopar tipo k.

Podem ser utilizados termopares do tipo K, para medir a temperatura da água de resfriamento na entrada e na saída do motor Stirling, dos gases de exaustão e nos queimadores, conforme a Figura 48.

Figura 48. Termopar Tipo K



Fonte: Autoria própria

- Tacômetro digital.

O tacômetro digital (Figura 49) será utilizado para aferir a rotação no eixo do motor.

Figura 49. Tacômetro digital



Fonte: Autoria própria

- Medição de tensão e corrente.

Podem ser utilizados multímetros e/ou osciloscópios (Figura 50), que trarão uma melhor visualização da tensão e da corrente gerada pelo sistema.

Figura 50. Osciloscópio Agilent



Fonte: Autoria própria

### 5.3. Proposta para realização de experimento.

O objetivo deste descritivo é apresentar uma proposta de roteiro para a realização dos experimentos e trabalhos futuros, norteando os parâmetros para o funcionamento do motor Stirling Genoa 03, em diferentes regimes de operação, fazendo com que os principais parâmetros sejam conhecidos e mantidos sob controle, juntamente com a segurança na operação do equipamento. Foram definidos três parâmetros de funcionamento para serem analisados no motor:

- Pressão interna do fluido de trabalho do motor;
- Vazão da água de resfriamento do motor;
- Temperatura de aquecimento.

O método de análise de experimentos a ser executado pode utilizar três parâmetros, dois deles, a pressão interna do fluido de trabalho e vazão de água de resfriamento, poderão ser variados durante os ciclos, ficando somente a temperatura para ser monitorada, para que o funcionamento fique o mais estável possível durante os experimentos.

Para o ajuste de pressão do fluido de trabalho do motor, deve ser verificada a pressão do compressor de ar disponível para os experimentos, pois, a mesma tem que ser superior à pressão máxima atingida nos experimentos que é de 145 Psi. A escolha das pressões de

trabalho para os experimentos foi feita baseada nos ensaios realizados com o motor Genoa 03, em Hayashi (2019), onde era utilizando 6 níveis de pressão: 5, 6, 7, 8, 9 e 10 Bar, valores esses, arredondados, equivalentes a 70, 85, 100, 115, 130 e 145 Psi, respectivamente.

Para efetuar a variação da vazão da água de resfriamento, pode ser utilizado um inversor de frequência. Para aferir e controlar a intensidade do fluxo d'água, a variação da rotação da bomba do motor Stirling, já que a mesma não possui ajuste de fluxo, pode ser utilizado um medidor de fluxo (Figura 50), instalado em série com a linha de circulação de água, juntamente com o ajuste de rotação do inversor de frequência. Os valores de ajuste de vazão de resfriamento deverão ser discutidos com os instrutores, e deverão proporcionar a maior diferença de temperatura entre a parte quente e fria do motor Stirling. Isso deve ser avaliado caso a caso, para obter a melhor eficiência no funcionamento do sistema.

A partir destas definições, podem ser gerados vários experimentos para buscar as respostas para os cálculos de: potência elétrica, eficiência elétrica, temperatura da água de resfriamento, consumo de combustível e, até mesmo, análise dos gases provenientes da combustão.

Com a anotação destes dados, durante os ensaios, é possível analisar o desempenho do motor Stirling quando comparamos a variação de dados de entrada, como, por exemplo, a pressão de operação, a vazão d'água do circuito de resfriamento, o fluxo de gás GLP para os queimadores ou a temperatura dos queimadores, com dados de saída, como rotação das polias do motor ou kWh gerados. Esses exercícios poderão ser discutidos durante os experimentos, para que seja estimulada a pesquisa dos alunos.

#### **5.4. Procedimentos para o funcionamento do motor Stirling.**

A seguir, será apresentado um descritivo, passo a passo, para colocar em funcionamento o conjunto motor gerador/motor Stirling Genoa 03:

**Passo 1** - Alocação e verificação de todos os instrumentos de medição e equipamentos de segurança (EPIs):

- Verificar as indicações dos medidores de pressão do fluido de trabalho do motor;

- Verificar o medidor de vazão de gás;
- Verificar o medidor de vazão de água de resfriamento do motor;
- Instalar os termopares para medir a temperatura da água na entrada e na saída do motor Stirling, nos queimadores e na exaustão do sistema;
- Verificar se a área das polias está livre, e alertar as pessoas envolvidas com os experimentos, sobre o risco de contato com as mesmas, quando estiverem girando;
- Fazer a conexão do adesivo refletivo nas polias do motor e gerador, para que sejam aferidas as rotações com o tacômetro digital;
- Verificar as conexões com o compressor (ar comprimido), para que não existam vazamentos de ar, pois uma queda de pressão pode inviabilizar o experimento;
- Deve ser determinado o uso de equipamentos de segurança e determinada uma distância de segurança em relação à bancada, para todos os envolvidos com os experimentos, pois o sistema operará com altas temperaturas e haverá polias em movimento;
- Por questão de segurança, deve ser evitado durante os experimentos, o uso de vestimentas frouxas e de cabelos longos soltos, para evitar que possam ser tracionadas pelas partes móveis;
- Deve ser verificada a saída de gases do sistema, para que a mesma libere todos os gases da queima do GLP para uma área externa aberta, fora do ambiente dos experimentos. Se possível, as tubulações de exaustão devem estar envoltas em uma manta de proteção, para evitar possíveis acidentes com as partes quentes do motor.

Os equipamentos de proteção individual devem estar em posse de todos os operadores, para o início dos experimentos, tais como:

1. Luvas para evitar queimaduras;
2. Óculos de proteção ou protetor facial;
3. Protetor auricular.

**Passo 2** - Verificar se o tanque de água do sistema de resfriamento está cheio, e somente após, acionar a chave para ligar o circuito de resfriamento do motor e o disjuntor do

compressor de ar, deixando-o no modo automático.

**Passo 3** - Fazer a conexão dos botijões à linha de combustível e ao medidor de vazão (se for utilizar), e abrir a válvula de alimentação.

**Passo 4** - Verificar as condições aparentes do motor, como vazamentos ou falta de componentes para o funcionamento.

**Passo 5** - Verificar a conexão e o aperto das correias do motor gerador ao motor Stirling e ligá-lo a fonte de tensão DC para a sua partida, com a tensão e corrente ajustadas conforme a anotação do item 4.2 - Descrição da bancada de ensaios.

Deverá ser monitorada a drenagem de corrente do motor DC durante o ciclo de funcionamento, usando um multímetro ou osciloscópio.

**Passo 6** - Durante o início do funcionamento, o moto gerador DC estará trabalhando como motor, para dar o impulso mecânico ao motor Stirling e iniciar o ciclo de funcionamento. Esse passo deve ser monitorado para que não ocorram problemas. É importante verificar se a rotação está ocorrendo sem nenhum tipo de obstrução ou ruído.

**Passo 7** - Verificar se a pressão do fluido de trabalho nos manômetros do compressor e do motor Stirling estão de acordo com o ajuste, com a pressão inicial de 70 Psi. Quando a operação do motor estiver estável, verificar se a medição da corrente drenada pelo motor DC está decrescendo. Quando ela estiver próxima de zero (0) Ampère, deve-se desligar a fonte DC, e o motor Stirling estará em funcionamento.

Se durante o procedimento de partida do motor ocorrer alguma falha, deve-se observar o problema apresentado, e juntamente com o responsável pelo equipamento, procurar anomalias mecânicas ou qualquer erro que possa comprometer a integridade do equipamento e dos operadores no local. Não encontrado nenhum erro, e sem riscos aos operadores, deve-se tentar novamente uma outra partida do motor, até que o mesmo entre em operação.

**Passo 8** - Neste momento, o motor DC estará funcionando como gerador, e poderão ser realizados os experimentos e medições de parâmetros.

**Passo 9** - Ao aumentar a pressão interna de trabalho do motor para o próximo valor

programado, aguarde aproximadamente 10 minutos até que o motor se estabilize neste novo ajuste, e repita o passo 8. Faça isso para cada novo ajuste de pressão.

**Atenção** - É recomendável trabalhar com uma pressão interna do motor de no máximo 145 Psi, pois na alteração efetuada na tampa de vedação do eixo do motor Stirling foi usado um retentor para suportar no máximo 160 Psi.

**Passo 10** - Depois de realizadas todas as medições dos parâmetros, e com o motor a plena carga, deve-se retirar a carga do motor (pressão interna de trabalho) por etapas, decrescendo de 10 em 10 Psi de pressão, aguardando a estabilização da operação para cada condição, até que o motor esteja operando com 70 Psi de pressão. Neste momento, já é possível fazer o fechamento do registro do compressor de ar e da entrada do motor Stirling.

**Passo 11** - Com o motor a 70 Psi de pressão e funcionando estavelmente, desligar a alimentação de gás (GLP) do medidor de vazão de gás. Fique atento durante este procedimento de desligamento, e verifique se a pressão interna do motor Stirling se mantém com 70 Psi quando este parar completamente. Esse é um indicativo de que o motor esta estanque com o fluido de trabalho.

**Passo 12** - Fechar a válvula do combustível no botijão de gás.

**Passo 13** - Desligar a bomba de água do circuito de resfriamento do motor, após 10 minutos da parada do motor, para amenizar a temperatura e dar mais segurança aos operadores.

**Passo 14** - Retirar os instrumentos de medição adicionados.

**Passo 15** - Fazer a limpeza dos equipamentos e instrumentos, e guardar tudo em local apropriado.

## 6. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Para dar início aos experimentos, todos os envolvidos deverão ter participado da execução dos procedimentos de funcionamento do motor Stirling, descritos no subitem 4.4, para que os operadores tenham familiaridade com os procedimentos de funcionamento e segurança do equipamento.

Conforme o subitem 4.4 (Proposta para realização de experimento), pode-se gerar 6 grupos de medições, variando a pressão em 6 níveis: 70, 85, 100, 115, 130 e 145 Psi.

O responsável pelos experimentos pode separar a turma em grupos de 4 ou mais integrantes, dividindo os integrantes em até 6 grupos, um para cada experimento (nível de pressão). Dentro do grupo, pode-se fazer a divisão de tarefas (funções) entre os mesmos, em:

- Responsável pelo ajuste da alimentação de combustível (GLP) nos bicos queimadores e aferição das temperaturas de combustão e exaustão;
- Responsável pelo ajuste e monitoramento da pressão do compressor e a pressão de trabalho do motor Stirling;
- Responsável pelas aferições e ajustes de temperatura de entrada e saída e vazão d'água do sistema de resfriamento;
- Responsável pela anotação e tabulação dos dados medidos a cada ajuste, e responsável por coordenar o ciclo inicial de funcionamento do motor Stirling, junto com o responsável técnico do equipamento.

É importante informar a todos os integrantes que sigam os procedimentos de segurança listados no passo 1 do subitem 4.1.1 (procedimento para o funcionamento do motor Stirling), e que os mesmos são responsáveis pela segurança das suas respectivas funções, e que a qualquer visualização de erros ou anomalias no sistema, os mesmos deverão informar imediatamente ao responsável técnico presente.

## 6.1. Parte 1 - Acionamento

### Objetivo:

Colocar em funcionamento o sistema do moto gerador Stirling, utilizando os procedimentos de funcionamento descritos anteriormente, seguindo todos os passos descritos, e com atenção aos procedimentos de segurança.

### Como executar:

Para executar este experimento deverá ser seguido os passos do subitem 4.4.1 até o passo 8. A quantidade de integrantes para a execução do experimento é de no mínimo (4) alunos, conforme descritivo de funções no subitem 4.5 (Realização do experimento).

Tempo de execução:

Tempo total – 30 minutos.

Tempo parcial – Descrito em cada etapa da execução.

Os tempos aproximados para a execução do experimento podem variar de acordo com a desenvoltura e prévia leitura dos procedimentos de funcionamento do motor Stirling.

### Passo a passo para a execução:

**Passo 1** - Duração de aproximadamente 10 minutos. *Checklist* dos procedimentos de verificação, ligação dos instrumentos de medição e instrução de utilização dos equipamentos de segurança EPIs para a proteção dos operadores;

**Passo 2** - Duração de aproximadamente 01 minuto. Verificação do nível do tanque de água, acionamento da bomba de circulação de água do circuito de resfriamento do motor e acionamento do compressor de ar comprimido, deixando-o em modo automático;

**Passo 3** - Duração de aproximadamente 10 minutos. Fazer a conexão dos botijões à linha de combustível, conectar o medidor de vazão (se for utilizar), abrir a válvula de alimentação e acionar os queimadores, verificando a temperatura;

**Passo 4** - Duração de aproximadamente 01 minuto. Verificar as condições visuais externas do motor, observando se existe vazamentos ou falta de componentes para o funcionamento;



**Passo 5** - Duração de aproximadamente 02 minutos. Verificar o estado visual e o aperto das correias do motor gerador ao motor Stirling;

Ligar a fonte de tensão DC para a sua partida, com a tensão e corrente ajustadas conforme a anotação do subitem 4.2 (Descrição da bancada de ensaios);

Usar um multímetro ou osciloscópio para monitorar a drenagem de corrente do motor DC durante o ciclo de funcionamento.

**Passo 6** - Duração de aproximadamente 01 minuto. Monitorar o ciclo de acionamento do motor Stirling, para que o mesmo ocorra sem problemas, e verificar se a rotação ocorre sem nenhum tipo de obstrução ou ruído.

**Passo 7** - Duração de aproximadamente 02 minutos. Verificar a pressão do fluido de trabalho nos manômetros do compressor e do motor Stirling, se os mesmos estão de acordo com o ajuste para a pressão inicial de 70 Psi.

Se, durante o procedimento de partida do motor, vier a ocorrer alguma falha e o motor não entrar em funcionamento, deve ser efetuada uma nova verificação inicial dos parâmetros e tentado um novo procedimento de partida do motor, até que o mesmo entre em operação.

**Passo 8** - Duração de aproximadamente 03 minutos. Verificar se o motor está estabilizado em 70 Psi de pressão interna, e medir a corrente drenada pelo motor DC, conforme o passo 5 deste procedimento. Se estiver próxima de zero (0) Ampère, significa que o motor Stirling está em funcionamento e o motor DC, estará funcionando como gerador, podendo então ser anotados os parâmetros do experimento.

## **6.2. Parte 2 - Medições**

### **Objetivo:**

Efetuar as medições dos parâmetros descritos abaixo, para posterior tabulação e verificação, fazendo a anotação na tabela 2 (Anotação dos parâmetros medidos). Para cada ajuste de pressão do fluido de trabalho deverão ser anotados os seguintes parâmetros:

- Temperatura no aquecedor;
- Temperatura na parte fria do motor;

- Temperatura da água de resfriamento na entrada e saída do motor;
- Vazão da água de resfriamento do motor (se possuir ajuste);
- Vazão de combustível (consumo);
- Potência elétrica de saída do motor;
- Rotação do motor.

**Como executar:**

Para executar este experimento é pré-requisito que a parte 1 do experimento já tenha sido efetuada até o passo 8 do subitem 4.4.1. Seguindo o mesmo, as medições estão descritas do passo 9 até o passo 14. A quantidade de integrantes para a execução do experimento é de no mínimo (4) alunos, conforme descritivo de funções no subitem 4.5 (Realização do experimento).

Conforme mencionado no subitem 4.4 (Proposta para realização de experimento), foram gerados 6 experimentos, variando-se a pressão em 6 níveis 70, 85, 100, 115, 130 e 145 Psi. Sendo assim este experimento pode ser dividido em 6 equipes de 4 ou mais integrantes, perfazendo um total de 6 conjuntos de medições, já que, para cada troca de pressão, devem ser executados os mesmos procedimentos de funcionamento.

**Tempo de execução:**

Tempo total – 35 minutos.

Tempo parcial – Descrito em cada etapa da execução.

Os tempos aproximados para a execução do experimento podem variar de acordo com a desenvoltura e prévia leitura dos procedimentos de funcionamento do motor Stirling.

**Medida 1** - Medição da temperatura no aquecedor e na parte fria do motor:

Duração de aproximadamente 10 minutos.

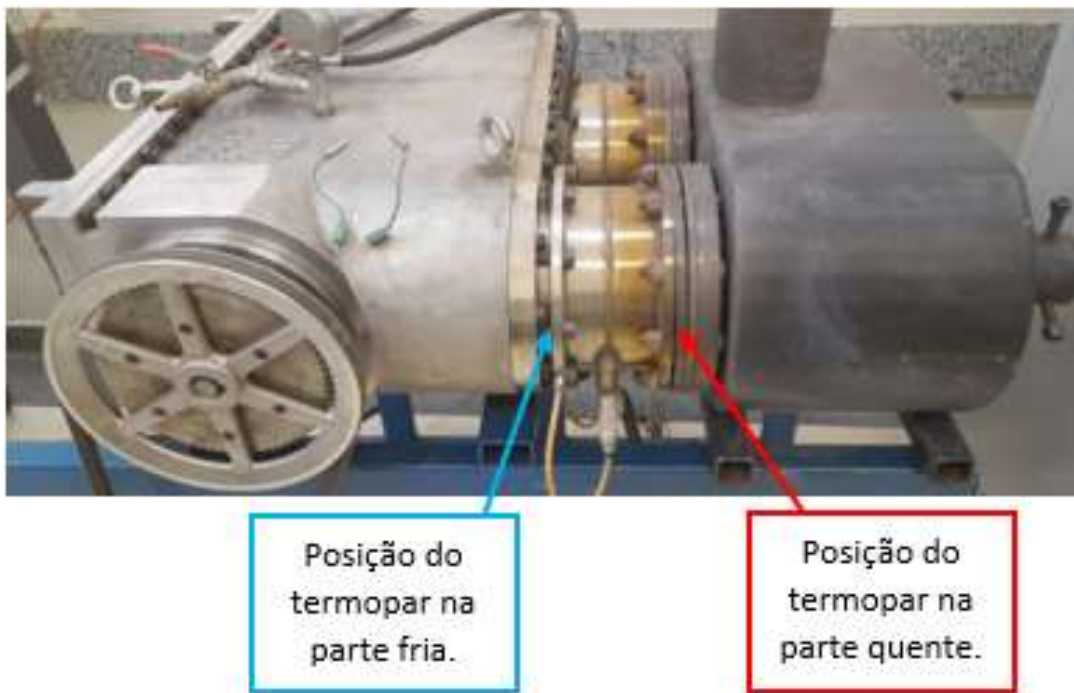
A medição das temperaturas no aquecedor e na parte fria do motor podem ser executadas no mesmo procedimento, pois os termopares estarão posicionados bem próximos um do outro, conforme a Figura 51, que identifica o local para a colocação dos mesmos.

A medição da temperatura da parte quente do motor Stirling deve estar próxima de

700 °C e a temperatura fria entre 40 e 80 °C.

Efetuar as primeiras medições dos parâmetros descritos com a pressão de trabalho em 70 Psi, lembrando que este procedimento deverá ser repetido para cada novo ajuste de pressão de trabalho do motor nas próximas medições de 85, 100, 115, 130 e 145 Psi.

Figura 51. Posicionamento dos termopares para a medição



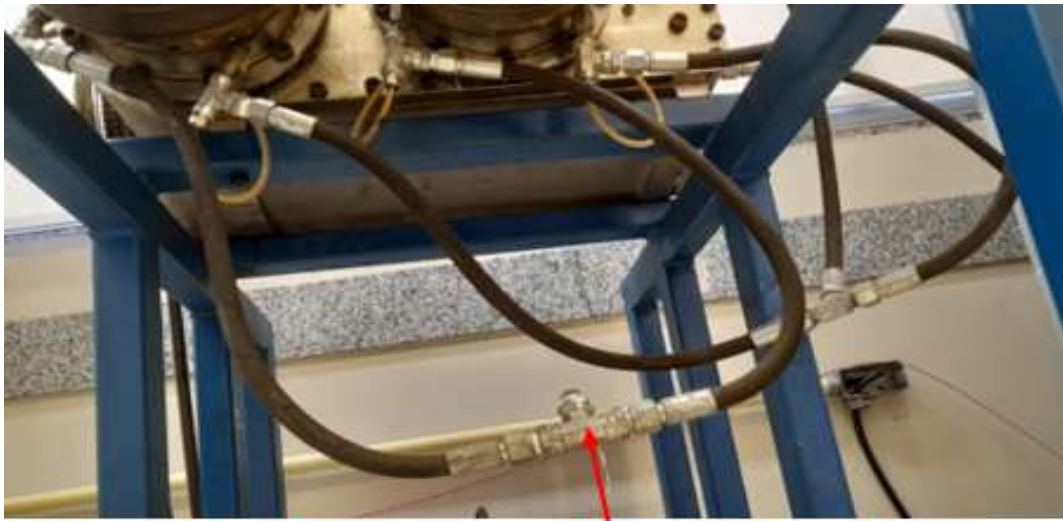
Fonte: Autoria própria

**Medida 2** – Medição da temperatura da água de resfriamento na entrada e saída do motor:

Duração de aproximadamente 05 minutos.

A medição das temperaturas no sistema de resfriamento do motor deverá ser aferida nas mangueiras de entrada e saída de água do motor Stirling, conforme Figura 52, que identifica o local para a colocação do sensor de temperatura junto à junção T metálica ou na saída de água desta mesma tubulação, dentro do reservatório.

Figura 52. Medição de temperatura na saída de água do motor



Ponto para a medição da temperatura

Fonte: Autoria própria

A medição da temperatura da água de entrada no motor pode ser efetuada na conexão metálica da saída de água do radiador de refrigeração, conforme a Figura 53.

Figura 53. Medição de temperatura da água de entrada no motor

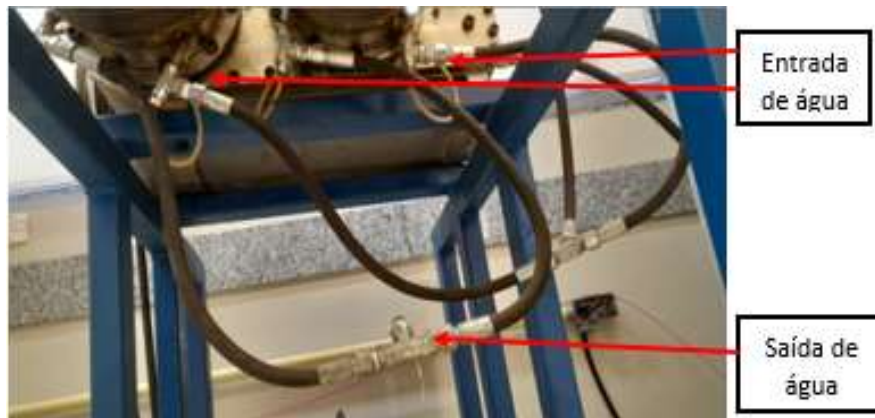


Ponto para a medição da temperatura.

Fonte: Autoria própria

A Figura 54 permite visualizar as conexões de entrada e saída de água no motor Stirling.

Figura 54. Pontos de entrada e saída de água do motor Stirling



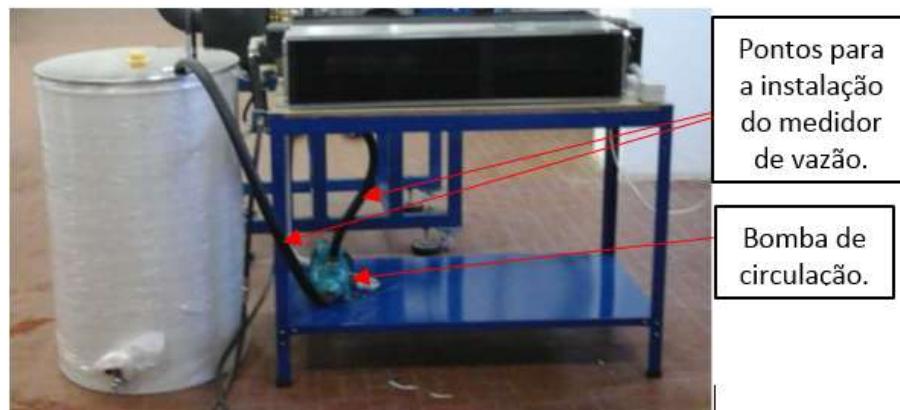
Fonte: Autoria própria

### Medida 3 – Medição de vazão da água de resfriamento do motor:

Duração de aproximadamente 05 minutos.

A medição de vazão neste experimento pode ser executada de maneira instantânea com a utilização de um medidor de vazão digital (Figura 50), conforme mencionado no subitem 4.3 (Preparação para o uso do motor Stirling), que deverá ser instalado em serie na tubulação entre o reservatório de água e o Motor Stirling. O melhor ponto recomendado, devido ao diâmetro das tubulações do sistema de resfriamento, foi nas tubulações de entrada ou de saída da bomba de circulação (Figura 55). Para ajustar a vazão deverá ser instalado um inversor de frequência, para a variação da rotação da bomba, pois a mesma tem rotação fixa.

Figura 55. Sistema de circulação de água



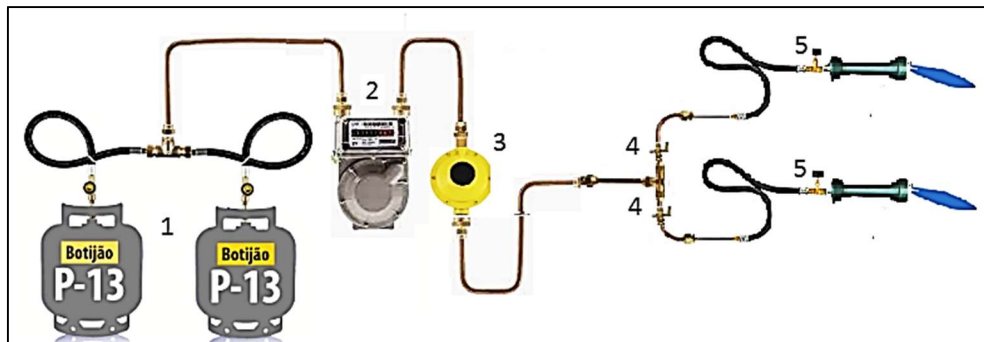
Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.38)

#### Medida 4 – Medição da vazão de combustível:

Duração de aproximadamente 05 minutos.

Para fazer a medição de vazão neste experimento é necessária apenas a leitura do contador numérico do aparelho, que informará qual a quantidade de gás está sendo consumida no momento do aquecimento do motor Stirling. Como o experimento é didático, não está sendo relacionada nenhuma outra variável da concentração do gás, que possa alterar o resultado da medição. O medidor de fluxo deve ser instalado conforme o esquema de ligação da Figura 56.

Figura 56. Esquema de ligação do medidor de vazão de gás



Fonte: Autoria própria

Os equipamentos que aparecem na Figura 56 são os seguintes:

- 1- Botijões de 13Kg GLP;
- 2- Medidor de vazão de gás;
- 3- Regulador de Pressão;
- 4- Registros de gás;
- 5- Queimadores de gás para câmara de combustão do motor Stirling.

#### Medida 5 – Medida e cálculo da potência elétrica de saída do motor:

Duração de aproximadamente 05 minutos.

Para efetuar a medição da quantidade de potência gerada, poderá ser utilizado um sistema, já previamente montado no laboratório, que contém 10 resistores de 47 W, para serem usados como carga (Figura 57), de modo que o cálculo da potência gerada pode ser

feito através da Equação 1.

$$P = V \cdot I \quad (\text{Equação 1})$$

Variando-se o valor da resistência equivalente da carga, pode-se definir a potência máxima gerada.

Quando falamos de tensão gerada por um gerador, temos de pensar em 3 tipos de potências (gerada, dissipada e útil), então podemos utilizar as Equações 2 a 5 para determinar a potência gerada pelo gerador:

**Equação do gerador**

$$U_{ab} = f.e.m - r \cdot i$$

(Equação 2)

Onde:

$U_{ab}$  = Tensão ab

f.e.m = Força eletromotriz.

$r$  = Resistencia interna.

$i$  = corrente.

**Potência gerada**



$$P_{tot} = f.e.m \cdot i$$

(Equação 3)

**Potência dissipada**



$$P_d = r \cdot i^2$$

(Equação 4)

**Potência útil**



$$P_u = P_{tot} - P_d$$

(Equação 5)

Figura 57. Placa com arranjo de resistências de 47 W



### Medida 6 – Aferição da velocidade de rotação do motor Stirling.

Duração de aproximadamente 05 minutos.

Para aferir a velocidade de rotação do motor, é necessário afixar uma etiqueta refletiva em um ponto nas bordas da polia do motor e posicionar o foco do laser do tacômetro digital na direção da posição da etiqueta afixada, e aguardar alguns segundos até obter uma medição estabilizada de rotação.

O tacômetro sugerido para utilização pode ser visto na Figura 49, subitem 4.3 (Preparação para o uso do motor Stirling).

Os dados medidos devem ser anotados na Tabela 2, que será disponibilizada pelo professor.

Tabela 2. Anotação dos parâmetros medidos

Pressão interna do motor (Psi)	Vazão de água (L/h)	Potência (W)	Temp. aquecedor (°C)	Temp. água resfriamento (°C)	Temp. de exaustão (°C)	Vazão de gás (Kg/h)	Rotação do motor (rpm)
70							
85							
100							
115							
130							
145							

Fonte: Autoria própria



## 7. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi apresentar o princípio de funcionamento dos motores Stirling, em particular do gerador Stirling marca Genoa Stirling modelo 03-2014, e realizar melhorias no motor para o funcionamento em uma bancada didática em laboratório. Trazendo uma abordagem mais aprofundada sobre o motor Genoa adquirido pela UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, juntamente com procedimentos de funcionamento e sugestões de ensaios, que podem ser executados com esse equipamento, num ambiente de laboratório didático, isso permitirá que novos ensaios, análises e pesquisas sejam desenvolvidos.

A tecnologia de geração e cogeração com motores Stirling atualmente apresenta-se bastante promissora, principalmente devido à característica destes motores de combustão externa, que permitem o uso de uma grande variedade de tipos de combustíveis para seu funcionamento.

Este trabalho documenta, de maneira didática, os princípios de funcionamento deste motor, a investigação das limitações construtivas e o estudo das principais partes.

As modificações mecânicas efetuadas no sistema Stirling, juntamente com as informações reunidas neste trabalho servirão como material instrutivo para o público que pretende se aprofundar nas pesquisas sobre os motores Stirling e na construção de novos protótipos. Além disso, foi possível reafirmar as vantagens competitivas deste motor com relação a outras máquinas térmicas, com destaque para sua aplicação em sistemas de geração de energia elétrica.

Pela pesquisa bibliográfica efetuada, observou-se que existem poucos estudos relacionados à parte construtiva e de procedimentos de funcionamento de sistemas que utilizam motores Stirling para estudos em laboratórios didáticos, indicando que essa tecnologia é promissora e ainda está em fase de desenvolvimento, e os procedimentos e roteiros de experimentos utilizando o motor Stirling, sugeridos neste trabalho podem ser de grande valia para novas pesquisas.

São diversas as possibilidades de utilização do motor Stirling. Sempre que houver algum processo que envolva uma diferença de temperatura, é possível se pensar na utilização de um motor Stirling. O aproveitamento de um calor gerado, que seria liberado na atmosfera, torna-se uma fonte de alimentação a custo zero para o motor Stirling. Quando o calor gerado é proveniente de uma fonte renovável, a energia gerada é uma energia verde, que não agride o meio ambiente e promove a sustentabilidade.

Como sugestões de trabalhos futuros, propõe-se:

- Realização de um estudo minucioso e aprofundado nos sistemas de acionamentos do motor Stirling;
- Instalar o sistema Stirling em uma bancada fixa, com forno para múltiplos combustíveis;
- Alterar o Máquina CC, por uma máquina AC (síncrona ou de indução), para maior robustez.
- Construção de um sistema híbrido que possa operar com biogás e energia solar simultaneamente.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, N. B.; CUNNINGTON, J. M.; WESTRA, L. J.; KLEIN, M. K.; ODOM, E. M.; SMELSER, R. E. **Adapting the MIT Stirling engine project at the University of Idaho, a land grant institution**. Proceedings of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition (ASEE), 2002.

ANDRADE, Marcelo Leandro Feitosa de; MASSABNI, Vânia Galindo. **O desenvolvimento de atividades práticas na escola: um desafio para os professores de ciências**. Ciência & Educação, Bauru, v. 17, 2011.

BARROS, R. W. **Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis**. 141 f. Universidade Federal De Itajubá, 2005.

BRAGA, C. A. **Modelagem Termodinâmica e Elétrica de Motores Stirling Classe Alfa**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Formiga. FORMIGA – MG, 2018.

CAETANO, B. C. **Metodologia Numérica para Projeto e Previsão de Desempenho de Motor Stirling Tipo Beta**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte - MG, 2019.

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.

COSTA, J. P. S.; SILVA, J. V. M.; PIMENTEL, M. S.; MALVEIRA, B. M.; SILVA, V. S. P.; VIEIRA, A. V. N.; CRUZ, A. F. S.; LIMA, G. H. G. **Desenvolvimento de uma bancada didática de motor stirling**. Brazilian Journal of Development, v.7, n.1, p.6918-6931, Curitiba, jan., 2021.

CRUZ, V. D. **Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo Gama**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

DAEFLEX. **Medidores de gás modelo G0.6**. 2022. Disponível em: <https://daeflex.com.br/produto/medidor-de-gas-g0-6/>. Acesso em 20/07/2022.

DIAS, L. V. R. **Modelagem e Análise Experimental de um Protótipo Didático de Motor**

**Stirling**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2016.

DULLIUS, N. H. **Modelagem e Análise Experimental de um Motor Stirling Tipo Alfa**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná. PALOTINA – PR, 2019.

FAGERHEIM, K. L. **Educational Analysis-Program for Stirling Engines. Master's thesis in Engineering and ICT**. Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Mechanical and Industrial Engineering. June, 2022.

FURTADO, G. N.; NOVENTA, M. M. **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, Vitória- ES, 2014.

GARCÍA, Miguel Torres; TRUJILLO, Elisa Carvajal; GODINHOE, José Antonio Vélez; MARTÍNEZ, David Sánchez. **Thermodynamic Model for Performance Analysis of a Stirling Engine Prototype**. *Energies*, 5 October, 2018.

GENOASTIRLING. **Use and maintenance manual Genoa 03**. P.01-55, Genoastirling S.R.L, 2014.

HAYASHI, Augusto Shin Iti. **Análise de rendimento do motor Stirling para cogeração de energia**. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2019.

HIRATA, K. Schmidt. **Schmidt Theory of Stirling engines**. National Maritime Research Institute, Musashimurayama, 1995.

KONGTRAGOOL, B.; WONGWISES, S. **Optimum absorber temperature of a once-reflecting full conical concentrator of a low temperature differential Stirling engine**. *Renewable Energy*, v. 30, n. 11, p. 1671–1687, 2005.

MAJESKI, J. **Stirling Engine Assessment**. EPRI, Energy International, Inc. 127 Bellevue Way SE Suíte 200 Bellevue, WA 98004, v. 1, n. 3, p. 1–170, 2006.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. John Wiley & Sons, 4th ed., 2000.

MOREIRA, Marco Antônio. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. P. 7. Brasília: Editora da UnB, 2006.

MOURA, A. G. O. **Construção e Montagem do Motor Stirling Caseiro Tipo Gama como Estratégia de Ensino e Aprendizagem em Termodinâmica**. Universidade Estadual do Ceará, Faculdade de Educação, Ciências e Letras do Sertão Central, Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Quixadá – CE, 2016.

ODDONE, D. C. **Cogeração: uma alternativa para produção de eletricidade**. Dissertação (Mestrado) - Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

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

PAUTZ, E. R. **Estudo e projeto de um motor Stirling**. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013.

PEREIRA, Felipa. **Classificação dos Motores Stirling Conforme a Configuração**. 2012. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/motordestirling/motor-de-stirling/classificacao-dos-motores>>. Acesso em 25 set. 2022.

PILON, Antoni; DA LUZ, Gillian; DIAS, Logan Pillon; MADEIRA, Thaís Marques; RAMPINELLI, Reginaldo Tassi; CITTADIN, Tales Alfredo. **Sistema de cogeração de energia**. 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, Araranguá, v.3, n.1, p. 474-482, 2012.

PINO, Iker Gonzalez; IRIBARREN, Estíbaliz Péres; CELADOR, Álvaro Campos; ARANGUREN, Víctor Francisco de la Peña; LIZARRAGA, José Maria Sala. **Modelado de un motor Stirling para microgeneración y validación a partir de datos experimentales**. In: VIII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica. [Recurso electrónico]: libro de actas. Servicio de Publicaciones e Imagen Institucional, p. 563-574, 2013.

PULKRABEK, W. W. **Engineering fundamental of the internal combustion engine**. 2ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 2014.

SARAIVA, R. Z. **Máquinas Térmicas – Uma Proposta para o Ensino das Leis da Termodinâmica para o Ensino Médio**. Dissertação, Universidade Federal do Amazonas /

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas. Manaus – AM, 2016.

SILVA, E. L. B.; LOPES, B. M.; SILVA, C. H. F. **Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling**. Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e Universidade Federal de Itajubá (NEST/UNIFEI). Projeto de P&D Cemig/Aneel 123 (Código Aneel 0049-069/2004), 2009.

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

VICARI, M. V. **O Ensino da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica em uma Abordagem Investigativa Desenvolvida em Torno do Motor de Stirling**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2018.

VINEETH. C. S. **Stirling Engine – A beginners guide**. 2011. Disponível em: <https://dokumen.tips/documents/stirling-engine-a-beginners-guide.html?page=9>. Acesso em: 22/05/2022.

WAGNER, Andreas. **Calculations and experiments on  $\gamma$ -type Stirling engines**. PhD Thesis, University of Wales, Cardiff, 2008.