

CONTRIBUIÇÃO PARA ENSAIOS COM MOTOR STIRLING

Contribution to Tests with Stirling Engine

Jeziel Fande de Oliveira¹



<https://orcid.org/0009-0003-1382-1000>

Frederico Silva Moreira²



<https://orcid.org/0000-0002-4279-8546>



RESUMO

A procura por novas formas de se obter energia, de forma sustentável e barata, é crescente. O objetivo deste trabalho é analisar o motor Stirling como aplicação de ensaios práticos e instrumento de inovação, no processo de aprendizagem teórica e prática para alunos do curso de engenharia. Para isso, serão feitos ajustes e modificações no sistema, para que os testes de geração e cogeração de energia, utilizando o motor Stirling, sejam o mais didático possível, de forma que os alunos possam estudar, 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.

Palavras-chave: Motor Stirling. Geração de energia. Aprendizagem.

80

¹ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, e Técnico Administrativo da UFMS. E-mail: jeziel.oliveira@ufms.br

² Professor no Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade da Faculdade de Engenharias, Arquitetura Urbanismo e Geografia da UFMS. E-mail: frederico.moreira@ufms.br

ABSTRACT

The search for new ways to obtain energy, in a sustainable and cheap way, is growing. The objective of this work is to analyze the Stirling engine as an application of practical tests and an instrument of innovation, in the process of theoretical and practical learning for students of the engineering course. For this, adjustments and modifications will be made to the system, so that the energy generation and cogeneration tests, using the Stirling engine, are as didactic as possible, so that students can study, in practice, the operating principles of this equipment, together with the execution of tests and experiments related to electricity generation, using LPG gas to produce thermal energy for its operation.

Keywords: Stirling engine. Power generation. Learning.

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 (ANDRADE, 2011).

Sendo assim, podemos entender que quando um aluno manipula um experimento científico, este procedimento colabora para o aumento da sua curiosidade sobre o tema estudado, permitindo, que em muitos casos, os conceitos físicos sejam absorvidos de maneira natural, sem que seja necessário o uso de equações, fazendo com o que a compreensão dos alunos seja melhorada em relação a temas básicos, como por exemplo, as leis da termodinâmica (REIF, 1965).

Dentro do campo proposto, foram efetuadas pesquisas sobre o uso de motores Stirling comerciais em bancadas didáticas, não sendo localizados procedimentos para executar ensaios de maneira didática, para cogeração de energia utilizando motores Stirling comerciais, somente encontrado a utilização de protótipos experimentais construídos com materiais não específicos.

Em grande parte, essa escolha é definida pelo fator financeiro, pelo fato dos motores Stirling serem pouco difundidos e utilizados, fazendo com que o preço para aquisição de modelos comerciais, com potencial de geração de energia, ainda seja alto.

Revista **GESTO-DEBATE**, Campo Grande - MS, vol.24, n. 04, p.80-114, jan/dez 2023.

Este trabalho apresenta o conceito e as características gerais dos motores Stirling, e faz uma análise detalhada dos componentes e equipamentos necessários para conduzir experimentos em bancada de laboratório, para o uso de didático de um motor tipo alfa da marca Genoastirling.

Material e Métodos

Esta pesquisa consiste no desenvolvimento de uma proposta metodológica de caráter exploratória para o desenvolvimento de um modelo de ensaio para o estudo de geração e cogeração de energia utilizando o motor Stirling, adquirido pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) no ano de 2015, avaliando e implementando as alterações viáveis para a atualização deste sistema, e montar um roteiro de funcionamento para que o sistema possa ser utilizado como plataforma didática de geração e cogeração de energia no setor de engenharias da Universidade.

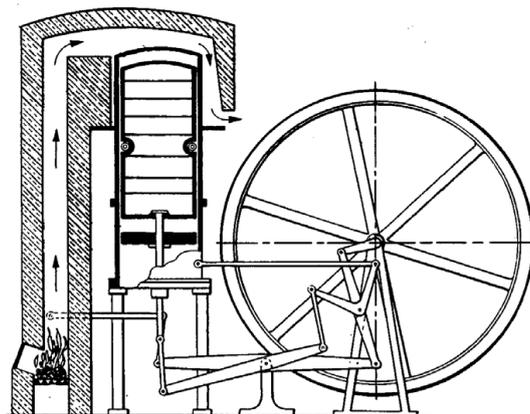
O desenvolvimento experimental envolverá, portanto, um estudo aprofundado sobre o princípio de funcionamento do motor, alterações de melhoria no sistema e propostas de estudo e testes a serem realizados para o aprendizado dos alunos.

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 serão realizadas 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.

Revisão da Literatura

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 1, 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 1 - Desenho da patente do motor Stirling.



Fonte: (Pino, 2013 p. 12)

O motor Stirling é um equipamento térmico que funciona com uma fonte externa de calor. Apesar desse tipo de motor ter sido inventado há mais de 200 anos, o mesmo ainda tem um custo de fabricação maior que outros motores, e ainda está na sua infância, do ponto de vista comercial.

Aspectos construtivos do motor

Os Motores Stirling são compostos normalmente pelos seguintes componentes:

83

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. O regenerador é um trocador de calor composto por tubos, metal poroso, ou finas placas de metal (aletas), que trocam calor com o gás.

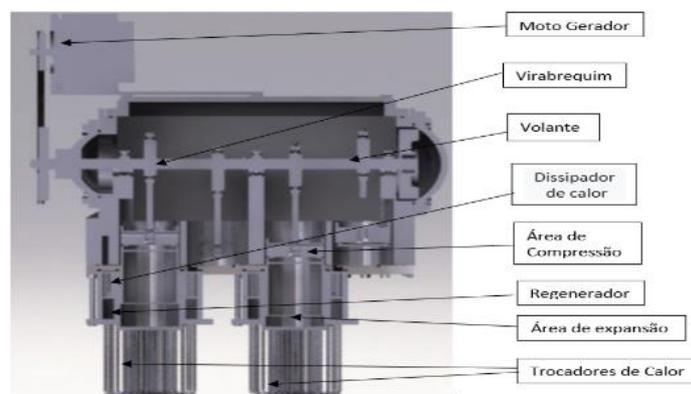
Fluido de trabalho: vários tipos de gases podem ser utilizados. O gás é completamente isolado das partes móveis do motor, e devem ser consideradas as pressões ideais de trabalho, para cada tipo de gás.

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 2, tem-se uma visão em corte do motor Stirling Genoa 03.

Figura 2 – Visão do motor Stirling Genoa 03, em corte.



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.2).

Classificação dos motores Stirling

Tipo alfa

O motor Stirling tipo alfa (Figura 3a) é composto por dois cilindros independentes. O pistão quente é chamado de pistão deslocador, e é responsável pela produção do movimento, devido à variação de pressão interna do sistema. O pistão frio é chamado de pistão de potência/trabalho, e tem a função de comprimir e descomprimir o fluido de trabalho (HAYASHI, 2019).

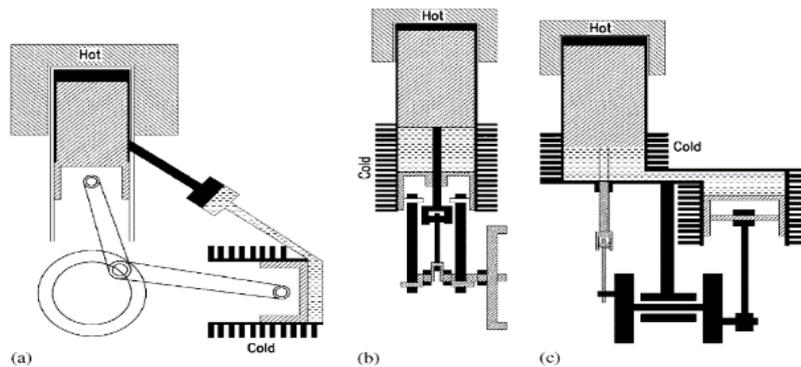
Tipo beta

O motor Stirling tipo beta (Figura 3b) 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.

Tipo gama

Como no tipo alfa, o tipo gama (Figura 3c) também possui dois cilindros independentes. O pistão deslocador faz o deslocamento do fluido de trabalho, enviando-o até a câmara do pistão de potência (WAGNER, 2008).

Figura 3– Motores Stirling tipo alfa, beta e gama.



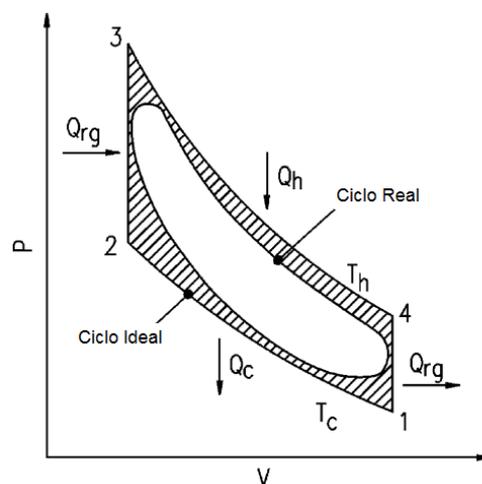
Fonte: (CORRIA *et al.*, 2006)

Ciclo Stirling

O ciclo de Stirling é um Ciclo termodinâmico, que descreve o sistema de funcionamento geral dos motores Stirling. Semelhante ao ciclo de Carnot, ciclo teórico (Figura 7) onde uma máquina térmica atinge sua máxima eficiência, este possui uma estimativa real de eficiência térmica de aproximadamente 45% (Vineeth, 2011).

85

Figura 4 –Ciclo real e ideal de um motor Stirling.



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

O Ciclo teórico se dividido 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.

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. O mesmo tem seu funcionamento através de uma fonte externa de calor, que pode ser qualquer combustível sólido, líquido ou gasoso (PULKRABEK, 2014).

Funcionamento do motor Stirling

86

O “ciclo” do motor 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. Compressão isotérmica (temperatura constante) 1→2

Neste processo 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;

2. Aquecimento isocórico (volume constante) 2→3

O pistão de compressão vai até o ponto morto superior, enquanto o pistão de expansão se movimentam para baixo. Com isso o fluido de trabalho passa para o espaço de expansão, sendo

aquecido pela fonte externa aumentando a pressão;

3. Expansão isotérmica (temperatura constante) 3→4

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

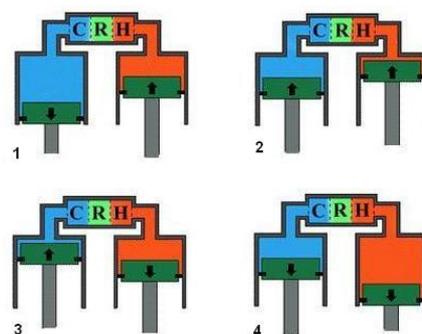
4. Resfriamento isocórico (volume constante) 4→1

O pistão quente retorna até a posição superior enquanto, simultaneamente, o pistão frio desce, quando o gás passa novamente através do regenerador, entregando calor que será usado novamente na fase dois. Esta transformação é a volume constante, o que causa uma queda de pressão do gás.

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 5 expressa a sequência do ciclo para o motor Stirling tipo Alfa. É interessante observar a defasagem de 90° entre os pistões de compressão e de expansão.

Figura 5 - 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 4→1 seja usado

como calor fornecido no processo 2→3. Consequentemente, todo o calor fornecido ao fluido de trabalho de fontes externas ocorreria no processo isotérmico 3→4, e todo o calor rejeitado para as vizinhanças ocorreria no processo isotérmico 1→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).

Fluido de trabalho

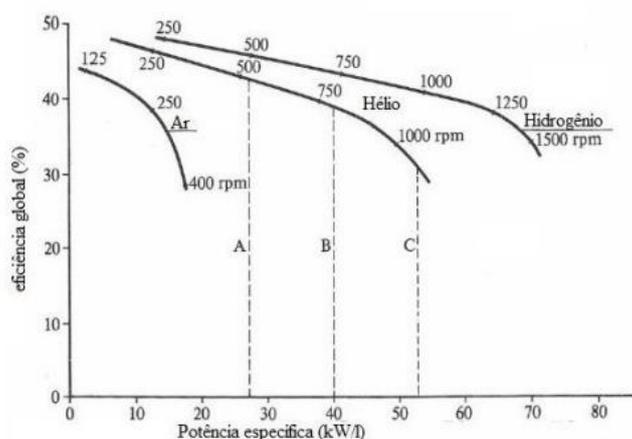
O ar foi o fluido de trabalho mais utilizado no século 19, e na maioria dos motores Stirling de baixa potência da atualidade, por ser fácil de operar nos regeneradores, e por ser abundante.

Existem vários tipos de gases que podem ser utilizados como fluido de trabalho nos sistemas Stirling, mas, devem ser consideradas as pressões ideais de trabalho, para cada tipo de gás.

Os fluidos de trabalho mais utilizados em motores Stirling são: ar, hélio, nitrogênio e hidrogênio. O fluido de trabalho deve apresentar alta transferência de calor, baixa viscosidade e baixa densidade. Estas propriedades podem variar de acordo com o aumento da temperatura (Thombare e Verma, 2008).

Em 1954, a empresa Philips começou estudos com hélio e hidrogênio como fluido de trabalho em motores Stirling. Já em 1970 foi utilizando um software da mesma empresa e foram feitos ensaios comparando os três principais fluidos de trabalho utilizados em motores Stirling, conforme a Figura 6. Concluiu-se com esse experimento que, com o aumento da rotação há uma diminuição da eficiência do sistema, e o fluido que apresenta o melhor resultado é o gás hidrogênio.

Figura 6 – Comportamento dos fluidos de trabalho.



Fonte: (Abete, 2013).

RESULTADOS

O motor Stirling utilizado neste trabalho foi adquirido em 2014, pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, da empresa italiana Genoastirling S.R.I. Ele fazia parte de um projeto, cujo objetivo inicial era o estudo de viabilidade para a instalação do sistema em indústrias ceramistas, no estado de Mato Grosso do Sul, e para estudos de cogeração de energia.

89

Este equipamento ficou parado por alguns anos, devido à falta de informação do fabricante, e por ter sido constatado que o mesmo não estava girando livremente, mesmo não acoplado ao gerador, denunciando que poderia haver algum travamento mecânico das partes móveis do equipamento.

Após várias intervenções mecânicas no equipamento, foi iniciado o procedimento para ativá-lo. Conforme orientação do fabricante, foi iniciada a montagem para os testes e coleta de dados e medições, que podem ser encontradas no trabalho de Hayashi (2019). O sistema apresentou uma baixa eficiência como gerador de energia, devido estar apresentando vazamento de fluido de trabalho em vários pontos.

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, com as características na Tabela 1, são descritos a seguir:

- 01 Motor *Stirling* do tipo alfa com 4 cilindros modelo GE03-0014 (Figura 7);

Figura 7 - Protótipo Motor Stirling modelo GE03-0014.



Fonte: Autoria Própria

- 01 Moto gerador DC marca Drive Systems potência 3Kva (Figura 8);

Figura 8 - moto gerador DC.



Fonte: Autoria Própria

- 01 unidade controladora com 4 sensores termopar (Figura 9), 1 sensor de pressão;

Figura 9 - 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 10) para medir a pressão do cilindro do Motor;

Figura 10 – conector do sensor de pressão HPS-C.



Fonte: Autoria Própria.

- 01 Suporte para motor Stirling e unidade de combustão (Figura 11);

Figura 11 - 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 12);

Figura 12 - 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 0,75 cv e radiador (Figura 13);

Figura 13 – Radiador para refrigeração e bomba de circulação.



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

- 01 unidade reservatório para circulação de água com capacidade de 300 litros (Figura 14).

Figura 14 - Reservatório de água.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 01 - 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 ³)	153,2
Deslocamento do cilindro de compressão	(cm ³)	524,6
Expansão do cilindro de volume morto	(cm ³)	153,2
Cilindro de expansão de deslocamento	(cm ³)	524,6
Ciclo de expansão de compressão de deslocamento	(α°)	90

CARACTERÍSTICAS DO AQUECEDOR		
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 ²)	3,39
Área molhada	(cm ²)	1777,89
Volume total VH	(cm ³)	133,34

CARACTERÍSTICAS DO REFRIGERADOR		
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 ²)	6,79
Área molhada	(cm ²)	888,95

93

Fonte: Genoa 03 (2014, p.2).

Comissionamento do motor Stirling

Desmontagem para verificação mecânica do acoplamento motor/gerador

Para que o protótipo possa funcionar de maneira mais eficiente, é necessário que os problemas relatados 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 15.

Figura 15 - Motor Stirling Genoa 03 BATLAB/UFMS.



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, e 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 16 pode-se observar o motor sem a tampa de pressurização, e pode ser visto o anel de borracha responsável pela vedação.

94

Figura 16 - Motor Stirling Genoa 03 sem a tampa de pressurização.



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se notar na Figura 17, que o eixo do motor Stirling não tem uma chaveta para o travamento da polia no eixo do motor. Seu travamento é feito apenas por pressão no eixo, através de uma bucha excêntrica, e a transmissão é feita por corrente. A usinagem do eixo, para a colocação de chaveta e a mudança da transmissão por corrente para outra de borracha faz parte das modificações a serem executadas, trazendo mais flexibilidade e menor vibração ao protótipo na bancada.

Figura 17 - Motor Stirling Genoa 03 sem a corrente e a coroa da transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 18 tem-se uma visão da frente do eixo do virabrequim, local onde serão feitas as medições para a usinagem do flange com retentor para alta pressão e rolamento, para a posterior instalação do novo sistema de transmissão, que é uma das melhorias propostas para este sistema.

Figura 18 - Eixo do virabrequim do motor Stirling Genoa 03.



Fonte: Autoria Própria.

Usinagem do flange

Para a usinagem da flange, foram verificadas várias medidas e tolerâncias (Figura 19). Esse serviço deve ser realizado apenas por profissional capacitado. Pela dificuldade de se fazer o transporte até uma empresa de tornearia, devido ao peso (150 kg) e dimensões do conjunto, todas as medições foram realizadas no próprio local.

Figura 19 - Verificações das medidas para a usinagem



Fonte: Autoria Própria.

Foi comprado uma peça de aço 4140, com 240 mm de diâmetro por 40 mm de espessura (Figura 20), para a usinagem da flange, que permitiria a eliminação do suporte do gerador e da tampa pressurizada, que representavam fontes de vazamentos de ar. Eliminando vários pontos de vedação duvidosa, espera-se uma melhor estabilidade da pressão interna do sistema.

Figura 20 - Tarugo de aço Sae 4140



Fonte: Autoria Própria.

O próximo passo foi instalar um retentor bilabial para pressões de até (160 Psi) do lado interno da flange, para fazer a devida vedação e um rolamento do lado externo, para dar mais estabilidade e proteger o retentor das vibrações causadas pela rotação no eixo do motor.

Após a instalação e verificação da flange, observou-se que os roscas de fixação do bloco do motor Stirling estavam, quase todas, com o passe da rosca danificada, possivelmente pela colocação de parafusos diferentes do especificado, ou pelo excesso de aperto, visto que anteriormente o suporte do gerador DC descarregava todo o peso do gerador no suporte fixado nesta base. Para auxiliar a instalação e dar uma sobre vida nas roscas do bloco do motor, as roscas foram limpas e passado um abridor de roscas na medida correta (Figura 21), e foram trocados os 10 parafusos, de acordo com as medidas do fabricante, para dar linearidade ao aperto.

Revista **GESTO-DEBATE**, Campo Grande - MS, vol.24, n. 04, p.80-114, jan/dez 2023.

Figura 21 - Abertura da rosca do bloco



Fonte: Autoria Própria.

A usinagem do eixo para a colocação de chaveta, foi feita no local, de forma artesanal (Figura 22). Com isso, não há mais o risco de a polia girar e ocorrer a perda de tração do gerador durante os experimentos.

Figura 22- Usinagem do eixo do motor para o uso de chaveta.



Fonte: Autoria Própria.

Após a limpeza e conferência de todas as medidas, deixando a base do motor pronta para receber a nova tampa do eixo do virabrequim, a mesma foi instalada no motor Stirling (Figura 23), a próxima etapa será a instalação das novas polias para o acoplamento do motor ao gerador, que será através de correias de borracha, que possibilitará mais flexibilidade ao acionamento gerando menos vibração que o sistema original que era feito por corrente e engrenagens.

Figura 23 - Flange instalada no motor Stirling e com a chaveta 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 a finalidade de 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 possa ficar visível durante o seu funcionamento, facilitando a aferição da rotação e visualização do ciclo de funcionamento do motor, facilitando o trabalho didático com o equipamento.

98

As polias canal B (Figura 24), 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 as partes móveis do motor e gerador ficarem fora do alcance visual dos operadores, pois ficavam dentro do módulo pressurizado. O conjunto motor gerador montado, já com os melhoramentos pode ser visto na Figura 25.

Figura 24 - polia canal B do motor e gerador.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 25 - Motor Stirling e gerador já com as polias instaladas.



Fonte: Aatoria Própria.

Descrição da bancada de ensaios

Motor Stirling e gerador

Será utilizado um motor gerador Stirling, tipo alfa, marca Genoastirling, modelo Genoa 03, montado junto com um gerador de corrente contínua marca Drive Systems com potência de 3 kVA, conectado mecanicamente através de uma correia de borracha.

99

Combustível utilizado

O protótipo está preparado para operar com gás liquefeito de petróleo (GLP). 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 regulação de pressão, e ligadas a um medidor de vazão de gás.

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 trocador de calor horizontal tipo radiador, reduzindo a temperatura do fluxo de água que retorna ao reservatório.

Sistema pneumático

O fluido de trabalho a ser utilizado será o próprio ar, e para ser injetado para 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 (aproximadamente 360 Psi) para gerar os 3 kVA, mas, como o objetivo do uso do equipamento é didático, não é necessário e nem seguro trabalhar com pressões muito altas.

Sistema elétrico

O funcionamento do moto gerador de corrente contínua, do fabricante Drive Systems, para fazer girar o motor Stirling Genoa 03, pode ser iniciado de duas maneiras:

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

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.

100

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

- Medidor de gás;
- Medidor de vazão de água;
- Sensores de temperatura tipo k;
- Tacômetro digital;
- Medidor de corrente e tensão.

Procedimento para funcionamento do motor Stirling

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

Revista **GESTO-DEBATE**, Campo Grande - MS, vol.24, n. 04, p.80-114, jan/dez 2023.

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

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 comprimido, 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 moto gerador ao motor Stirling e ligá-lo a fonte de tensão DC para a sua partida, com a tensão e corrente ajustadas. 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 motor gerador DC estará trabalhando como motor, para dar o impulso mecânico ao motor Stirling, para o início do ciclo de funcionamento. Esse passo deve ser monitorado, para que o mesmo ocorra sem 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, para a pressão inicial de 70 Psi.

Se durante o procedimento de partida do motor, vier a 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 nova partida do motor, até que o mesmo entre em operação.

Passo 8 - Quando a operação do motor estiver estável, em 70 Psi de pressão interna, 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. Neste

momento, o motor DC estará funcionando como gerador, e poderá ser utilizado para o início dos experimentos. Podem ser anotados os seguintes parâmetros, para cada ajuste de pressão do fluido de trabalho: temperatura no aquecedor; vazão de combustível (consumo); temperatura da água de resfriamento na entrada e saída do motor; vazão da água de resfriamento do motor, se possuir ajuste; temperatura na parte fria do motor; potência elétrica de saída do motor; rotação no eixo do motor.

Passo 9 - Terminadas as medições com a pressão de 70 Psi, pode-se 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.

Passo 10 - Depois de realizadas 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.

102

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.

Passo 12 - 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 13 - Fechar a válvula do combustível no botijão de gás.

Passo 14 - Retirar os instrumentos de medição adicionados.

Realização do experimento

Para dar início aos experimentos, todos os envolvidos deverão ter participado da execução dos procedimentos de funcionamento do motor Stirling, para que os operadores tenham familiaridade com os procedimentos de funcionamento e segurança do equipamento.

Podem ser gerados 6 grupos de medições, variando a pressão em 6 níveis: 70, 85, 100, 115, 130 e 145 Psi.

Revista **GESTO-DEBATE**, Campo Grande - MS, vol.24, n. 04, p.80-114, jan/dez 2023.

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.

103

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, com atenção especial aos procedimentos de segurança.

Como executar:

Para executar este experimento deveram ser seguidos os procedimentos descritos nos passos 1 até o passo 8. A quantidade de integrantes para a execução do experimento é de no mínimo (4) alunos.

Tempo de execução:

Tempo total – 30 minutos.

Tempo parcial – Descrito em cada etapa da execução.

Revista **GESTO-DEBATE**, Campo Grande - MS, vol.24, n. 04, p.80-114, jan/dez 2023.

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

Etapas da execução:

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

Etapa 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;

Etapa 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;

Etapa 4 - Duração de aproximadamente 01 minuto. Verificar as condições visuais externas do motor, como vazamentos ou falta de componentes para o funcionamento;

Etapa 5 - Duração de aproximadamente 02 minutos. Verificar o estado visual e o aperto das correias do moto 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.

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

Etapa 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 efetuado um novo procedimento de partida do motor, até que o mesmo entre em operação.

Etapa 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 a etapa 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.

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 4.1.1, e continuar seguindo o mesmo até o passo de número 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.

Etapa 1 - Medição da temperatura no aquecedor, temperatura da parte fria do motor.

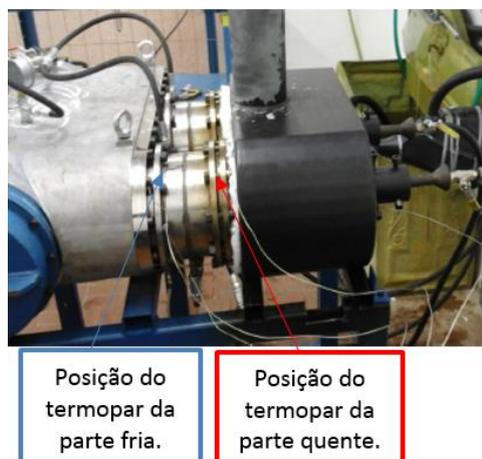
Duração de aproximadamente 10 minutos.

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 28, que identifica o local para a colocação dos mesmos.

A medição da temperatura da parte quente do motor Stirling deve ser próxima de 700 °C e a temperatura fria entre 40 e 80 °C, nos pontos indicados na Figura 26.

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 26 - Posicionamento dos termopares para a medição.



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.37).

Etapa 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 a Figura 27, 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.

107

Figura 27 – Medição de temperatura na saída de água do motor.



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.39)

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 28.

Revista **GESTO-DEBATE**, Campo Grande - MS, vol.24, n. 04, p.80-114, jan/dez 2023.

Figura 28 – Medição de temperatura da água de entrada no motor.



Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.39).

A Figura 29 - permite visualizar as conexões de entrada e saída de água no motor Stirling.

Figura 29 - Pontos de entrada e saída de água do motor Stirling.



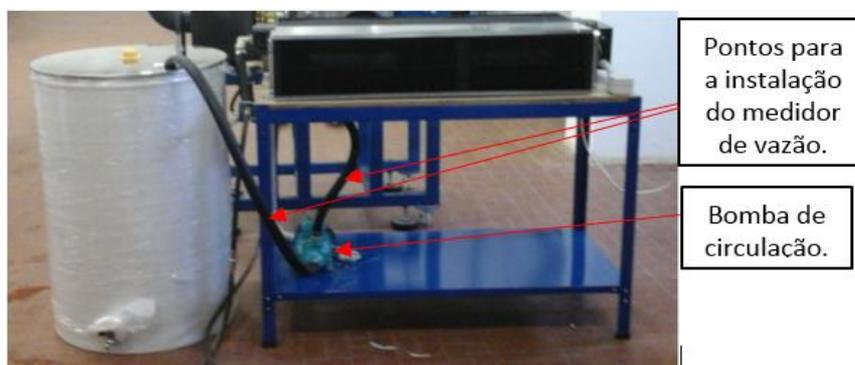
Fonte: Adaptada de manual do motor Genoa 03 (2014, p.10).

Etapa 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, 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, é nas tubulações de entrada ou de saída da bomba de circulação (Figura 30). 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 30 - sistema de circulação de água.



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

Etapa 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 31.

109

Figura 31 - Esquema de ligação do medidor de vazão de gás.



Fonte: Autoria própria.

Os equipamentos que aparecem na Figura 31 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 com encaixe para câmara de combustão do motor Stirling.

Etapa 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 32), 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:

110

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 32- Placa com arranjo de resistências de 47W.



Fonte: (HAYASHI, 2019).

Etapa 6 – Aferição da velocidade de rotação do motor Stirling.

Duração de aproximadamente 05 minutos.

Para aferir a velocidade de rotação do motor, é necessário somente afixar a 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.

111

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

Considerações Finais

Este trabalho teve como proposta apresentar o princípio de funcionamento dos motores Stirling, e em particular do gerador Stirling, marca GenoaStirling - modelo 03-2014, trazendo uma abordagem mais aprofundada sobre o motor Genoa adquirido pela UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, juntamente com o procedimento de funcionamento e sugestões de ensaios, que podem ser executados com esse equipamento, num ambiente de laboratório didático, de forma organizada e controlada, visando a segurança dos equipamentos e das pessoas envolvidas. A partir do maior conhecimento detalhado do sistema, será possível o desenvolvimento de novos estudos.

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

Pode-se concluir que, após realizada a pesquisa bibliográfica, existem poucos estudos relacionados à parte construtiva e 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, podendo ser implementadas novas melhorias tecnológicas.

112

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

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, a fim de melhorar a eficiência de funcionamento e construtiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

ABETE, A. J. **Testing and Optimization of the performance of a Stirling engine**. Hochschule Osnabrück. 218 f., 2013.

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.

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

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

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**. Brasília: Editora da UnB. 2006. P. 7.

PINO, Iker Gonzalez; IRIBARREN, Estíbaliz Péres; CELADOR, Álavaro 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, 2013. p. 563-574.

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

REIF, F. **Fundamentals of Statistical and Thermal Physics**. Mc Graw – Hill, 1965.

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

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 y-type Stirling engines**. PhD Thesis, University of Wales, Cardiff, 2008.

Recebido em: 14/06/2023

Aceito em: 02/10/2023

Publicado em: 13/11/2023

Total de Avaliadores: 02