



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
CAMPUS DE NATAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

Ekamiah Otacilio Evaristo da Costa

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UM
MOTOR STIRLING RECICLÁVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**NATAL
2023**

EKAMIAH OTACILIO EVARISTO DA COSTA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UM
MOTOR STIRLING RECICLÁVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Monografia apresentada ao Departamento de
Ciência e Tecnologia como requisito para a
obtenção do título de bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Dantas

NATAL
2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

C837a Costa, Ekamiah Otacilio Evaristo da
ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UM MOTOR
STIRLING RECICLÁVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA.. / Ekamiah Otacilio Evaristo da Costa. -
Natal/RN, 2023.
37p.

Orientador(a): Profa. Dra. Ana Lúcia Dantas.
Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia).
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Energia renovável. 2. Motor Stirling. 3. Ciclos termodinâmicos. 4. Materiais recicláveis. 5. Geração de energia elétrica. I. Dantas, Ana Lúcia. II. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pela Diretoria de Informatização (DINF), sob orientação dos bibliotecários do SIB-UERN, para ser adaptado às necessidades da comunidade acadêmica UERN.

EKAMIAH OTACILIO EVARISTO DA COSTA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UM
MOTOR STIRLING RECICLÁVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada ao Departamento de
Ciência e Tecnologia como requisito para a
obtenção do título de bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Dantas (Orientadora)
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN

Prof. Me. Dácio Michel da Cruz Souza
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN

Prof. Me. Jonathan Wallace da Silva Araújo
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar este espaço para expressar minha gratidão a todos que me apoiaram durante minha jornada acadêmica e contribuíram para o sucesso da minha pesquisa. Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família por seu apoio inabalável, amor e incentivo em todos os aspectos da minha vida. Sem a presença e o suporte deles, eu não teria chegado tão longe em minha jornada acadêmica.

Gostaria de agradecer também ao meu amigo João Vitor, que me acompanhou durante todo o processo do TCC, ajudando a aliviar o estresse e tornando a experiência mais agradável. Sua presença e amizade foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha namorada Larissa Gonçalves, gostaria de agradecer por seu apoio incondicional, paciência e incentivo ao longo deste processo. Sua compreensão e amor foram essenciais para que eu me mantivesse motivado e focado em meu objetivo.

Por fim, gostaria de agradecer à minha professora Ana Lúcia Dantas, que me guiou durante todo o processo do TCC. Sua orientação, incentivo e suas sugestões críticas foram fundamentais para o desenvolvimento da minha pesquisa. Agradeço por sua paciência, profissionalismo e dedicação em me ajudar a alcançar meus objetivos acadêmicos.

Novamente, agradeço a todos que contribuíram para o sucesso deste trabalho, o qual não seria possível sem o apoio e incentivo de cada um de vocês. Obrigado!

RESUMO

Este estudo científico apresenta uma visão geral da termodinâmica, que é uma área da física e da engenharia dedicada a estudar as propriedades da matéria e as interações dos sistemas com o ambiente. Destaca-se a importância da termodinâmica para enfrentar problemas atuais, tais como o uso eficiente de combustíveis fósseis, o desenvolvimento de tecnologias de energia renovável e a redução das emissões de gases de efeito estufa e poluição. O artigo também explora o motor Stirling, que é um tipo de motor de combustão externa inventado por Robert Stirling em 1816. O motor Stirling apresenta vantagens em relação aos motores a vapor, tais como alta eficiência e baixa emissão de produtos de combustão. O ciclo de Stirling é explicado como um ciclo termodinâmico que exibe a mesma eficiência térmica que o ciclo de Carnot, tornando-se uma inspiração para o desenvolvimento do motor Stirling. O trabalho proposto consiste na construção de um motor Stirling utilizando materiais recicláveis e na avaliação de sua viabilidade para a geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Energia renovável, Motor Stirling, Ciclos termodinâmicos, Materiais recicláveis, Geração de energia elétrica.

ABSTRACT

This scientific study provides an overview of thermodynamics, which is a field of physics and engineering dedicated to studying the properties of matter and interactions of systems with the environment. The importance of thermodynamics in addressing current issues, such as the efficient use of fossil fuels, the development of renewable energy technologies, and the reduction of greenhouse gas emissions and pollution is emphasized. The article also explores the Stirling engine, which is a type of external combustion engine invented by Robert Stirling in 1816. The Stirling engine has advantages over steam engines, such as high efficiency and low emissions of combustion products. The Stirling cycle is explained as a thermodynamic cycle that exhibits the same thermal efficiency as the Carnot cycle, serving as an inspiration for the development of the Stirling engine. The proposed work consists of building a Stirling engine using recyclable materials and evaluating its feasibility for generating electrical energy.

Keywords: Renewable energy, Stirling engine, Thermodynamic cycles, Recyclable materials, Electricity generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Ciclo de Carnot.....	16
Figura 2. Sistema fechado de um gás dentro de um cilindro.....	17
Figura 3. Ciclo de Stirling.....	20
Figura 4. Primeiro motor Stirling.....	21
Figura 5. Robert Stirling.....	22
Figura 6. Esquema de organização um motor Stirling do tipo beta.....	23
Figura 7. Representação de um modelo tipo gama.....	24
Figura 8. Esquema básico do motor Stirling do tipo alfa.....	25
Figura 9. Materiais.....	26
Figura 10. Virabrequim do projeto do motor Stirling.....	28
Figura 11. Gráfico de temperatura da fonte fria.....	31
Figura 12. Gráfico de temperatura da fonte quente.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Q. Calor .

W. Trabalho.

n. Número de mols.

T. Temperatura.

V. Volume.

P. Pressão.

\int . Integral.

ΔU . Variação de Energia interna.

R. Constante dos gases.

K. Kelvin.

$^{\circ}\text{C}$. Graus Celsius.

LISTA DE SÍMBOLOS

T_c . Fonte fria.

T_H . Fonte quente.

ΔS . Variação de Entropia.

S_i . Estado inicial.

S_f . Estado final.

dQ . Quantidade de Calor.

$p dV$. Gás ideal.

PV. Pressão e volume.

n. Rendimento.

δQ . Calor adicionado ou removido ao sistema.

δW . Trabalho realizado sobre ou pelo sistema.

pV. Pressão e Volume

DQ . Quantidade de calor.

T_{Kf} . Temperatura final em Kelvin

T_{Kq} . Temperatura em Kelvin

T_{\max} . Temperatura Máxima.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
3. ASPECTOS DA TERMODINÂMICA	13
3.1 CICLO DE CARNOT	14
3.2 CICLO DE STIRLING	20
4. HISTÓRIA DA INVENÇÃO DE ROBERT STIRLING	21
4.1 PISTÕES DO MOTOR STIRLING	22
4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES STIRLING	22
5. RESULTADOS E METODOLOGIA	25
5.1 CONSTRUÇÃO DO MOTOR	25
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	31
7. REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

A história dos motores começa com os primeiros experimentos com máquinas movidas a vapor no século XVIII. Naquela época, a principal aplicação da tecnologia era a produção de energia para a indústria e o transporte marítimo. No início do século XIX, o engenheiro britânico George Stephenson desenvolveu a primeira locomotiva a vapor, que revolucionou o transporte ferroviário e transformou a maneira como as pessoas se moviam e se comunicavam.

No final do século XIX e início do século XX, surgiram os primeiros motores a combustão interna, que utilizavam uma mistura de ar e combustível para gerar energia e movimentar o veículo. Os primeiros modelos eram bastante rudimentares e ineficientes, mas rapidamente evoluíram para se tornarem motores mais potentes e confiáveis (FERGUSON e KIRKPATRICK, 2015).

Contudo, o motor Stirling inventado no início do século XIX pelo escocês Robert Stirling foi uma das primeiras tentativas de se criar um motor térmico que pudesse rivalizar com os motores a vapor da época. O motor Stirling opera a partir de uma fonte de calor externa, que aquece um gás, geralmente o ar, que então se expande e empurra um pistão para gerar energia mecânica.

Embora o motor Stirling tenha sido inicialmente considerado uma alternativa promissora aos motores a vapor, ele acabou sendo suplantado pelos motores a combustão interna devido a uma série de limitações. O motor Stirling tem uma eficiência térmica relativamente baixa e uma taxa de potência muito baixa em relação ao seu tamanho e peso. Além disso, o design complexo do motor e sua operação em baixas velocidades tornam-no impraticável para muitas aplicações (WALKER, 1980.).

No entanto, o motor Stirling continua sendo uma tecnologia interessante e é frequentemente usado em aplicações especializadas, como geradores elétricos para satélites e fontes de energia térmica em locais remotos. Além disso, nos últimos anos, tem havido um interesse renovado no motor Stirling como uma alternativa potencialmente mais eficiente e limpa aos motores a combustão interna convencionais. Existem projetos de pesquisa em andamento para desenvolver motores Stirling mais avançados, que possam ser utilizados em carros e outros veículos.

Nesse contexto, considerando a relevância científica do tema, apresentaremos um estudo sobre o motor Stirling. O objetivo deste trabalho visa a construção do motor Stirling a partir de materiais recicláveis, bem como a avaliação sobre sua viabilidade para a geração de energia elétrica.

Na Seção 2, apresentaremos a termodinâmica envolvida no motor de Stirling, citando o ciclo de Carnot, inspiração para o ciclo de Stirling. Na Seção 3, descreveremos a história do motor Stirling, os materiais e procedimentos para a construção do motor de Stirling. E, finalmente, na Seção 4 apresentaremos uma discussão dos resultados e nossas conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

3. ASPECTOS TERMODINÂMICOS

Embora os aspectos da termodinâmica tenham sido estudados desde os tempos antigos, o estudo formal da termodinâmica começou no início do século XIX, considerando a capacidade de objetos quentes em produzir trabalho mecânico (MORAN, SHAPIRO e BOETTNER, 2018.)

A termodinâmica agora fornece conceitos e métodos essenciais para abordar questões críticas do século XXI como o uso de combustíveis fósseis de forma mais eficaz, a promoção de tecnologias de energia renovável e o desenvolvimento de meios de transporte mais eficientes em termos de combustível. Também são críticas as questões relacionadas às emissões de gases de efeito estufa e à poluição do ar e da água.

A termodinâmica é um ramo da física que é uma especialidade da engenharia. O cientista está normalmente interessado em obter uma compreensão fundamental do comportamento físico e químico de quantidades fixas de matéria em repouso e usa os princípios da termodinâmica para relacionar às propriedades da matéria. Os engenheiros geralmente estão interessados em estudar sistemas e como eles interagem com o ambiente.

Em 1816 foi criado um motor que utiliza fontes caloríficas para a transformação de energia em seu funcionamento. O desenvolvimento desta máquina só foi possível graças a um

engenheiro escocês chamado Robert Stirling. Logo depois da sua criação (GRASSELLI, 2018), sua invenção foi nomeada como "Motor Stirling", em sua homenagem.

Naquela década os motores que usavam o vapor como sua principal fonte de energia para o seu acionamento explodiam com uma certa ocorrência. Nesse caso, à época, o motor Stirling possuía as vantagens de alta eficiência e de baixa emissão de produtos de combustão. Além disso, como a combustão ocorre externamente e não dentro do cilindro como nos motores de combustão interna diminuía os riscos de explosão.

Segundo Grasselli (GRASSELLI, 2018), no ano de 1824, foi descoberto pelo engenheiro e militar Nicolas Léonard Sadi Carnot o que chamamos de "ciclo de Carnot". O ciclo de Carnot é um ciclo termodinâmico ideal. Em um ciclo de Carnot, o sistema que executa o ciclo passa por uma série de quatro processos internamente reversíveis: dois processos adiabáticos (não há troca de calor) alternados com dois processos isotérmicos (não há troca de temperatura).

O rendimento da máquina de Carnot é o máximo que uma máquina térmica trabalhando entre dadas temperaturas da fonte quente e da fonte fria pode ter (todavia, o rendimento nunca chega a 100%). De acordo com (SANTOS & CRUZ, 2017). Contudo, o ciclo de Carnot tornou-se uma inspiração para o "ciclo Stirling". Assim, o ciclo Stirling também consiste em quatro processos internamente reversíveis em série: compressão isotérmica do estado 1 para o estado 2 à temperatura T_C (fonte fria), aquecimento a volume constante do estado 2 para o estado 3, expansão isotérmica do estado 3 para o estado 4 à temperatura T_H (fonte quente) e resfriamento a volume constante do estado 4 para o estado 1 para completar o ciclo de Carnot. Em concordância com (SANTOS & CRUZ, 2017).

Conforme Melo (2019), "o ciclo de Stirling é principalmente de interesse teórico como exemplo de ciclo que exhibe a mesma eficiência térmica que o ciclo de Carnot. No entanto, um motor prático do tipo pistão-cilindro que opera em um ciclo regenerativo fechado com características em comum com o ciclo Stirling está em estudo há anos. Este motor é conhecido como motor Stirling". No motor Stirling, a energia é transferida para o fluido de trabalho a partir dos produtos da combustão, que são mantidos separados. Portanto, é um motor de combustão externa.

3.1 CICLO DE CARNOT

O conceito de energia é um dos conceitos mais unificadores na Física, pois a partir da energia podemos relacionar processos de naturezas diferentes, como por exemplo, mecânicos, térmicos e eletromagnéticos.

Segundo Reif (REIF, 2009), a termodinâmica trata das transformações energéticas dentro de um sistema (variação de energia interna) e das transferências energéticas, sob a forma de calor e trabalho, entre um sistema e o exterior. Em particular, um sistema pode receber trabalho e produzir calor, ou dito por uma forma de calor e produzir trabalho. Os sistemas que recebem calor e produzem trabalho são as máquinas térmicas.

A obtenção de trabalho a partir do calor data do século XVIII e surge ligada à resolução de problemas de elevação de pesos. Hoje em dia, as máquinas térmicas continuam a ser usadas na produção da maior parte da energia elétrica. Onde antes se usava a madeira como combustível, hoje se usa o carvão, gás, petróleo ou urânio. Porém, o objetivo é sempre transformar o calor em trabalho (REIF, 2009).

O objetivo do nosso trabalho é construir um motor Stirling, que é uma máquina térmica de acordo com a teoria da termodinâmica. Antes de abordar o ciclo desse motor, é necessário descrever a teoria dos gases para entender os diagramas de pressão versus volume e as leis termodinâmicas que são aplicáveis ao ciclo da máquina. De acordo com Oliveira Júnior, Santos e Santana (2021), essa compreensão é essencial para o sucesso do projeto

Historicamente devido à intrínseca relação entre calor e temperatura, foi difícil estabelecer com clareza a noção de calor, em particular distinguir entre quantidade de calor fornecida/cedida e a temperatura. Hoje se compreende que numa interação entre dois sistemas só se troca calor, não a temperatura. Segundo (OLIVEIRA JÚNIOR, SANTOS e SANTANA, 2021)

Nesse contexto, um sistema que pode ceder ou receber calor sem que sua temperatura se altere é chamado de fonte de calor. O oposto da fonte de calor é o termômetro, onde qualquer pequena quantidade de calor provoca uma variação de temperatura. Assim, a possibilidade de medir temperaturas deu origem a uma lei fenomenológica conhecida como a lei zero da termodinâmica, que diz: se dois objetos estão em equilíbrio térmico com um terceiro objeto, então eles estão em equilíbrio térmico entre si (DEUS, 2014).

Segundo Pimenta (apud DEUS, 2014), “a Primeira Lei da Termodinâmica é uma aplicação do princípio da conservação da energia para os sistemas termodinâmicos. De acordo com essa lei, a variação da energia interna de um sistema termodinâmico equivale à diferença entre quantidade de calor absorvido pelo sistema e o trabalho por ele realizado que é representada por $dU = -\delta W + \delta Q$.” O sinal negativo para o trabalho é apropriado para máquinas térmicas. A máquina de Stirling, por exemplo, recebe calor vindo de uma fonte de energia externa $\delta Q > 0$, e realiza trabalho $\delta W > 0$. Portanto, o trabalho fornecido para a vizinhança diminui a energia interna do sistema, por isso o sinal negativo no termo de variação do trabalho, como foi citado (MELO, 2019).

Antes de apresentar a Segunda lei da termodinâmica, há uma necessidade de se dialogar sobre os processos reversíveis e irreversíveis. De acordo com (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2016).pág. 258. “Um processo irreversível ou processo unidirecional (única direção correta), se dá quando não se pode ser desfeito por meio de pequenas mudanças no ambiente. Como por exemplo, quando um ovo cai no chão e se quebra, o processo é irreversível e não há como voltar ao seu estado anterior”.

Para que se possa apreender o sentido de um processo irreversível é necessário compreender uma propriedade chamada “entropia”, representada por ΔS (variação de entropia). A entropia significa o grau de desordem de um sistema. De acordo com Halliday (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2016), “A entropia é diferente da energia no sentido de que a entropia não obedece a uma lei de conservação. A energia de um sistema fechado é conservada; ela permanece constante. Nos processos irreversíveis, a entropia de um sistema fechado aumenta.”

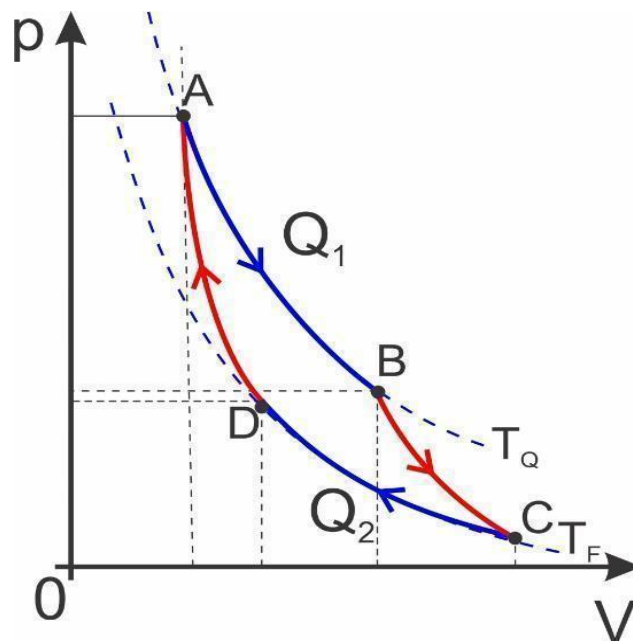
Uma consequência imediata da irreversibilidade é que uma máquina térmica irreversível sempre tem um rendimento menor do que uma máquina reversível que opere entre as mesmas temperaturas, como é o caso do motor Stirling.

“O processo é reversível se tanto o sistema quanto a sua vizinhança puder retornar aos seus estados iniciais. Isto é, para o processo original somado ao processo inverso a troca líquida de calor e o trabalho líquido devem ser zero. O processo pode até ser revertido e não ser considerado reversível, pois os valores de trabalho e calor líquido não são zeros” (BRUM, 2012).

“Processos reversíveis não ocorrem na natureza, sendo apenas idealizações de processos reais. Mas seu estudo é de grande importância primeiramente pela maior facilidade de análise e depois por apresentarem um modelo de idealidade de processos reais. Assim, por exemplo, na análise de um motor reversível podemos saber qual o máximo de trabalho que se é possível produzir e, portanto, se torna limite teórico para o processo irreversível. Como nos casos do ciclo de Carnot e do ciclo de Stirling, que trabalham com o ciclo fechado reversível.” (BRUM, 2012)

O ciclo de Carnot é uma máquina térmica teórica que representa o modo mais eficiente que se pode obter trabalho. A Figura 1 apresenta o diagrama pressão versus volume, conhecido como o ciclo de Carnot. O ciclo de Carnot passa por uma série de quatro processos internamente reversíveis: dois processos isotérmicos (de A para B e de C para D) alternados com dois processos adiabáticos (de B para C e de D para A) e pode ser executado por um sistema fechado ou um sistema aberto com escoamento em regime permanente.

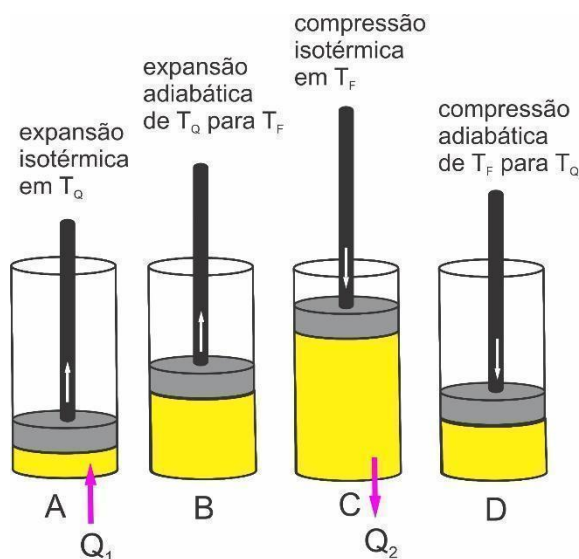
Figura 1. Ciclo de Carnot.



(FONTE:AUTOR)

Considerando um sistema fechado de um gás dentro de um cilindro-pistão adiabático (conforme Figura 2), os quatro processos reversíveis que formam o ciclo de Carnot são:

Figura 2. Sistema fechado de um gás dentro de um cilindro-pistão adiabático.



(FONTE: AUTOR)

Processo A-B: Expansão Isotérmica Reversível. O sistema recebe calor Q_1 e realiza trabalho W_{AB} contra a vizinhança. A expansão para ser isotérmica deve ser lenta o suficiente para que o reservatório de maior temperatura transfere calor ao gás de modo que possa ser considerada constante.

Processo B-C: Expansão Adiabática Reversível. O sistema não troca calor, mas realiza trabalho W_{BC} contra a vizinhança. Para que essa expansão seja adiabática deve haver isolamento no sistema a fim de que o calor transferido seja todo transformado em trabalho e haja a diminuição da temperatura.

Processo C-D: Compressão Isotérmica Reversível. O sistema perde calor Q_2 e recebe trabalho W_{CD} da vizinhança. A compressão é lenta o suficiente para que o reservatório de menor temperatura seja capaz de retirar o calor e manter a temperatura do sistema constante.

Processo D-A: Compressão Adiabática Reversível. O sistema não troca calor, mas recebe trabalho W_{DC} da vizinhança. Há elevação da temperatura durante o processo de compressão do reservatório de menor temperatura para o de maior.

No ponto de vista de Halliday (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2016) a variação de entropia se dá quando tem dois recipientes que possuem uma válvula, cada recipiente tem um gás ideal isolado e estão em um estado de equilíbrio, quando abre a válvula os gases se

misturam, o estado final do sistema tem mais desordem do que o estado inicial, ou seja, a variação de entropia do estado final do sistema apresenta um grau de desordem maior que o inicial. A equação que representa a variação de entropia para processos reversíveis como os ciclos de máquinas térmica é:

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

A entropia é uma variável que não é dependente do seu percurso, isso mostra que é uma variável de estado, onde ela tem um ponto inicial e um ponto final. Conforme Pimenta (apud DEUS, 2014), a segunda lei da termodinâmica vem associada com máquinas térmicas. De acordo com Pimenta (apud DEUS, 2014) a definição é “para produzir trabalho uma máquina térmica cíclica necessita de uma fonte quente, de onde tirar calor, e uma fonte fria, para onde envia calor”, esse conceito se relaciona com o ciclo de Carnot, pois o ciclo de Carnot tem o objetivo de demonstrar uma máquina térmica ideal.

De acordo com Pimenta (apud DEUS, 2014) a direção de A para B, na Figura 2, ocorre uma expansão isotérmica se a substância for um gás ideal (temperatura constante), assim o trabalho realizado contra a vizinhança é dado pela equação,

$$W_{AB} = \int_A^B p dV \quad (2)$$

onde $pV = nRT$. Logo,

$$W_{AB} = \int_A^B p dV = nRT_Q \int_A^B \frac{dV}{V} = nRT_Q \ln \ln \frac{V_B}{V_A} > 0. \quad (3)$$

Como a temperatura é constante, a energia interna não varia, isto é,

$$\Delta U = 0 \Rightarrow Q_1 = W_{AB} \cdot \quad (4)$$

Logo, a entropia é dada por $\Delta S = \frac{Q_1}{T_Q} \cdot$

A direção de B para C é uma expansão reversível adiabática (não existe troca de calor), portanto,

$$\delta Q = dU + \delta W = 0. \quad (5)$$

Assim, temos que:

$$0 = nR(T_F - T_Q) + W_{BC} \quad (6)$$

ou seja,

$$W_{BC} = nR(T_Q - T_F) > 0, \quad (7)$$

consequentemente, $\Delta S > 0$.

A compressão isotérmica reversível de C para D é dada por:

$$Q_2 = W_{CD} = nRT_F \ln \ln \frac{V_D}{V_C} < 0 \quad (8)$$

assim $\Delta S = -\frac{Q_2}{T_F}$.

Na compressão adiabática reversível, de D para A, temos que:

$$dU + \delta W = 0. \quad (9)$$

Logo,

$$W_{DA} = -nR(T_Q - T_F) < 0 \quad (10)$$

onde, $\Delta S = 0$.

Portanto, conforme Pimenta (apud DEUS, 2014) a quantidade total de um trabalho realizado no ciclo ABCD refere-se a:

$$W = nRT_Q \ln \ln \frac{V_B}{V_A} + nRT_F \ln \ln \frac{V_D}{V_C} \quad (11)$$

desse modo o rendimento de uma máquina de Carnot então é:

$$\eta = \frac{\text{Trabalho realizado pelo gás}}{\text{Calor absorvido pelo gás}} \quad (12)$$

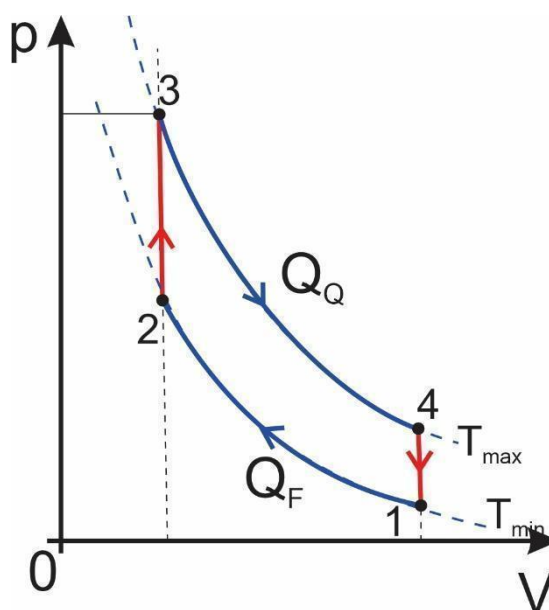
Ou seja,

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \frac{\ln \ln \frac{V_D}{V_C}}{\ln \ln \frac{V_B}{V_A}}. \quad (13)$$

3.2 CICLO DE STIRLING

O funcionamento de um motor Stirling é necessário a compreensão do seu ciclo, pois seu ciclo é composto por dois momentos isovolumétrico ou isocórico e dois isotérmicos. Conforme Castoldi, Furlanetto e Hamilton (2022) “é um de apenas de dois ciclos capazes de alcançar o ciclo de Carnot”. Na Figura 3, em concordância com (CASTOLDI; FURLANETTO; HAMILTON, 2022) apresentamos o diagrama pV de um ciclo Stirling, que consiste em:

Figura 3. Ciclo de Stirling.



(FONTE:AUTOR)

No processo 1-2: trabalha-se com a compressão isotérmica e rejeição de calor, na compressão da substância de trabalho no lado frio, onde ele será comprimido isotermicamente mantendo-se contato com o reservatório em baixa temperatura. Esse trabalho necessário é fornecido pelo pistão, operando a primeira Lei de Newton (inércia).

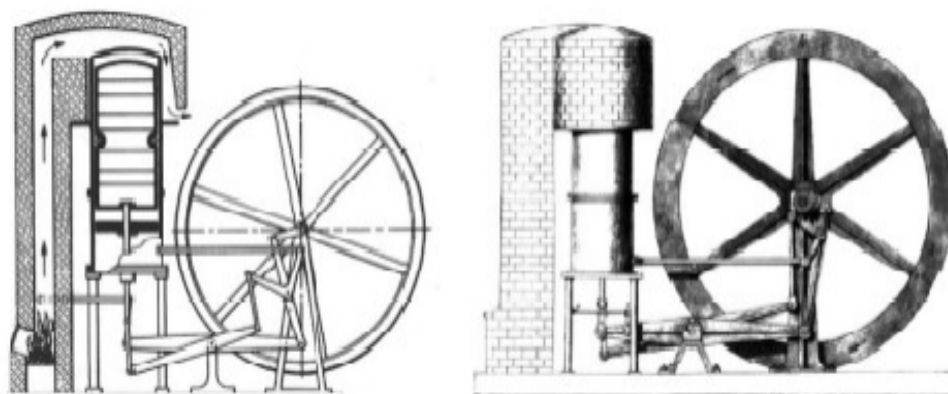
No processo 2-3: uma quantidade calor isovolumétrica é adicionada e a substância de trabalho tem uma interação com o regenerador, que cede energia em forma de calor para a substância de trabalho e elevar sua temperatura no máximo (T_{\max}), que eleva o ΔS (variação de entropia) e a pressão da substância de trabalho.

No processo 3-4: ocorre a expansão isotérmica e adição de energia em forma de calor.

4. HISTÓRIA DA INVENÇÃO DE ROBERT STIRLING

No ano de 1816 foi criado um motor, conforme Figura 4, com o intuito de ficar no lugar das máquinas a vapor, criado pelo engenheiro escocês chamado “Robert Stirling”, fotografia na Figura 5, em concordância com (VISERAS, 2016). “Sua invenção teve um avanço comercial no século XIX para o acionamento de bombas d’água de baixa potência” Castoldi, Furlanetto e *et al* (2022), posteriormente foi substituído por motores de alta eficiência e maior custo-benefício, essas variáveis fizeram com que o motor se tornasse esquecido por um tempo.

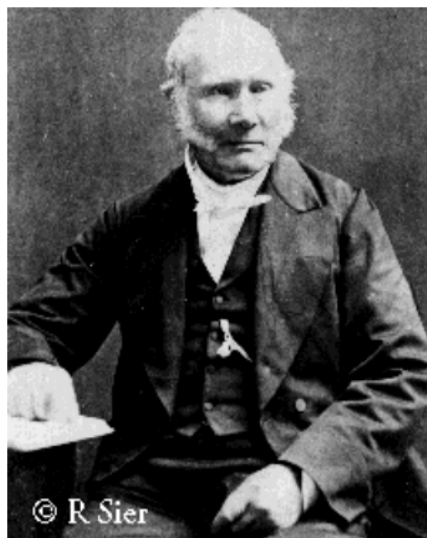
Figura 4. Primeiro motor Stirling construído



(FONTE: LEITE E *et.al* EROL,2018)

“É relevante também destacar a invenção do regenerador por Robert Stirling. Aplicado aos motores Stirling, o regenerador permite que o rendimento de seu motor de ar-quente seja muito maior, próximo ao rendimento teórico máximo que é ditado pelo “Ciclo de Carnot” (LIMA, 2014).

Figura 5. Robert Stirling



(FONTE:PAUZ APUD HIRATA 1995)

4.1 PISTÕES DO MOTOR STIRLING

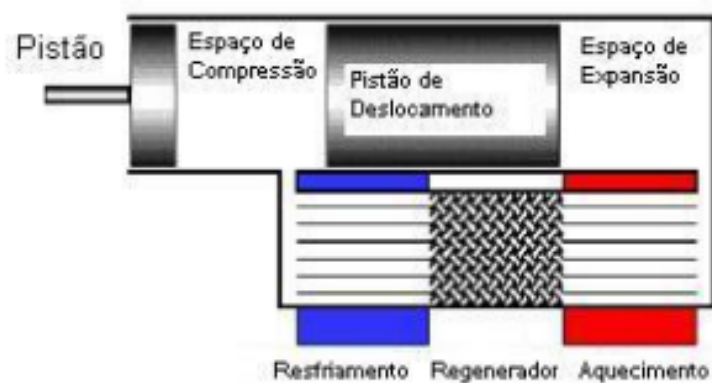
O motor Stirling é uma máquina térmica que funciona por meio de um ciclo termodinâmico, sendo que a classificação dos seus modelos é baseada no número de pistões. No entanto, todos os tipos de motores Stirling operam seguindo o mesmo ciclo termodinâmico. Essa característica será detalhada nos próximos tópicos, conforme mencionado por Cruz (2012). É importante ressaltar que o ciclo termodinâmico do motor Stirling apresenta alta eficiência térmica e baixa emissão de poluentes, o que o torna uma opção viável para a geração de energia em diversas aplicações.

4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES STIRLING

Conforme mostrado no texto anterior, sua classificação vem de acordo com seus pistões. Existem três tipos de motores Stirling: beta, gama e alfa (PAUTZ, 2013)

No motor Stirling beta, o seu deslocador e seu pistão estão unidos por meio de um exclusivo no cilindro, como disse (PAUTZ, 2013). De acordo com BARROS (BARROS, 2004), o motor Stirling do tipo beta os engenheiros e cientista os nomeiam de motores Stirling de deslocamento, pois seu fluido de trabalho tem um movimento de alta e baixa temperatura diante o seu ciclo.

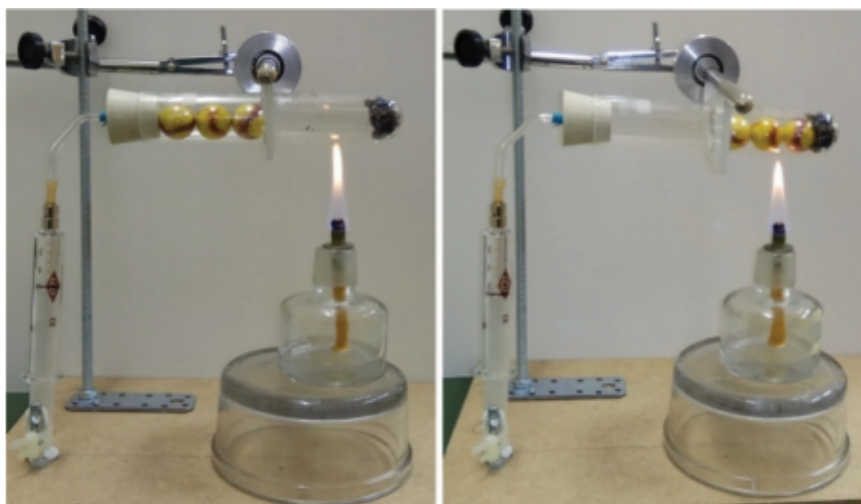
Figura 6. Esquema de organização de um motor Stirling do tipo beta



(FONTE: BARROS,2004)

O motor Stirling gama tem sua configuração baseada no formato do protótipo beta. Contudo, de acordo com (CACHUTÉ, 2006), a construção do motor gama tem uma maior facilidade comparado aos outros tipos de motores Stirling. Na sua composição é constituída por dois cilindros distintos, assim como o modelo beta, em que os pistões são conectados nos dois cilindros. Segundo “O pistão que atua na região quente é movimentado, levando o gás entre a região de alta e de baixa temperatura do cilindro, através do aquecedor, regenerador e resfriador” (CACHUTÉ, 2006).

Figura 7. Representação de um modelo do tipo gama

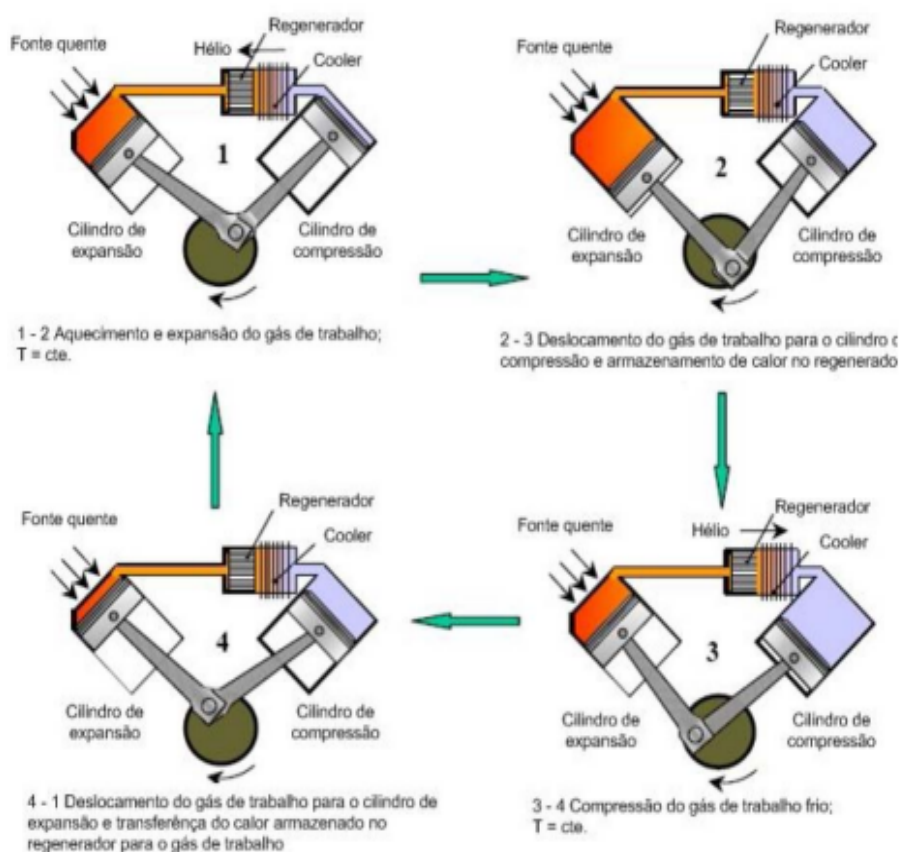


(FONTE:ALEMANY E ET.AL,2020)

De acordo com (CRUZ, 2012), no processo 1-2 de um motor Stirling alfa existe o aquecimento e expansão do fluido de trabalho (gás) mantendo-se em uma temperatura constante. O processo 2-3 acontece o deslocamento do fluido de trabalho para o cilindro, onde haverá uma compressão e armazenamento de calor no regenerador. Enquanto o processo 3-4 exibe uma compressão do fluido de trabalho em uma temperatura fria constante. Completando o ciclo, o processo 4-1 promove o deslocamento do fluido de trabalho para o cilindro de expansão e transferência de calor que está armazenado no regenerador para o gás de trabalho.

Segundo (ARAÚJO, 2017) a especialidade de um motor Stirling do tipo alfa é que ele possui arranjo em cadeia de dois cilindros distintos e interligado por via de um cano para que possa ter um caminho do fluido, tendo em vista que pode existir ou não um regenerador. Os seus cilindros estão ligados a um pistão, sendo assim o motor Stirling com a classificação alfa tem um pistão que opera na zona quente e outro na zona fria. Conforme a imagem:

Figura 8. Esquema básico do motor Stirling tipo alfa



(FONTE: Cruz apud PAULA,2007)

5. RESULTADOS E METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, realizamos uma pesquisa do tipo experimental. Segundo Gil (GIL, 2002): uma pesquisa experimental consiste em estudar um determinado objeto e as formas do seu controle pág. 47. Esta pesquisa é experimental, pois construímos um motor Stirling reciclável para analisar a sua vantagem na geração de energia elétrica.

5.1 CONSTRUÇÃO DO MOTOR

Os materiais utilizados no desenvolvimento deste motor são materiais de baixo custo e materiais reutilizados. Como por exemplo, latas de alumínio, um balão, palitos de churrasco, elásticos, lâ de aço, discos, ruelas, pregos, tampa de garrafa pet, broca, abridor de lata, lâmina de cortar, uma cola durepoxi, cola de silicone com alta temperatura, linha de pesca, canudo de plástico e cliques grande.

Descrevendo mais detalhamento, foram necessárias duas latas de alumínio de 235ml para se fazer a fonte quente e fonte fria onde o fluido de trabalho irá passar. Foi necessário fazer um corte em uma das latas em formato de retangular e um pequeno furo embaixo, com uma broca de 4 mm, para a passagem de um arame responsável por mover o pistão deslocador. Os palitos de churrasco forma necessários para a construção do pistão, que auxilia o virabrequim feito por um fragmento de arame. Uma lâ de aço e um pedaço de arame foram necessários para se fazer o pistão deslocador. A cola durepoxi foi utilizada para juntar as peças do motor.

A construção do motor fixo obedeceu às seguintes etapas: (1) Na primeira etapa, montamos a parte de baixo do motor onde será a fonte quente. Foi utilizado uma lixa para lixar a parte de baixo e em cima da lata para que possa desunir as partes que iremos utilizar para fazer o pistão deslocador. (2) Na segunda etapa, desenvolvemos o pistão deslocador com a junção de um pedaço circular de uma esponja de lavar louça e das partes que foram soltas na primeira etapa, em seguida feito um furo nessas partes com uma broca de 4 mm. (3) Na terceira etapa, produzimos o virabrequim (tipo de manivela). (4) Na etapa final, construímos a roda de oscilação do motor com um disco de ótico e logo em seguida foi encaixado o virabrequim com dois palitos de picolé furados na parte superior através de uma furadeira. Em

seguida a Figura 9 apresenta objetos (latas e disco) que foram usados na construção do motor, bem como um esquema do motor.

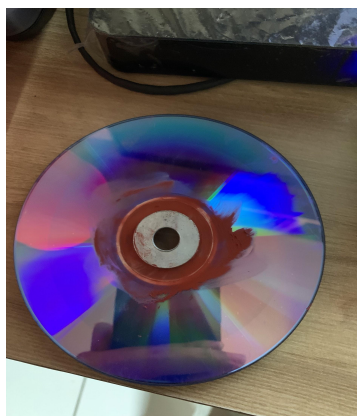
Figura 9. Materiais para (a) câmara de resfriamento, (b) câmara do motor, (c) roda de oscilação do motor, (d) pistão deslocador, (e) esquema do motor, (f) motor de Stirling produzido



(a) câmara de resfriamento



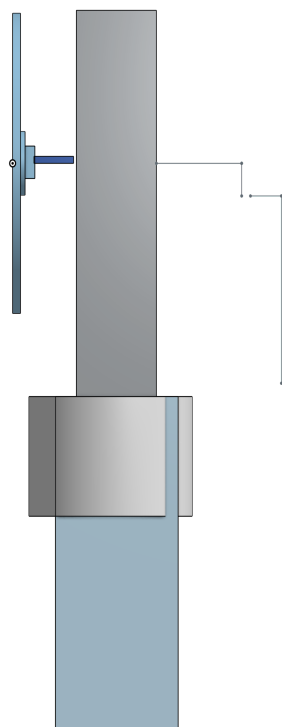
(b) câmara do motor



(c) roda de oscilação do motor



(d) pistão deslocador junto com a lâ de aço



(e) Projeto do motor



(f) Primeiro motor de Stirling



(g) Motor de Stirling

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A utilização de materiais recicláveis para o desenvolvimento do motor mostrou determinados benefícios, pois os produtos para sua fabricação foram de menor custo, fazendo com que qualquer indivíduo possa construir e menos danos ambientais. Todavia foi necessário adaptar sua construção para os materiais disponíveis em casa, o que pode ter causado a perda de desempenho e a eficiência do motor.

Mesmo assim, nosso primeiro projeto de motor Stirling não funcionou. Identificamos problemas no “virabrequim” que impediam que o motor ganhasse força suficiente para seu rendimento.

Figura 10. Virabrequim do projeto do motor



(FONTE:AUTOR)

O primeiro virabrequim foi construído a partir de uma parcela de arame de cerca elétrica com um pedaço de espeto de churrasco, perfurado com uma broca através de uma furadeira. Em seguida foram feitos novos testes para examinar o funcionamento do motor, mas sem sucesso, pois o pistão deslocador feito por uma lã de aço estava dando problema no seu deslocamento dentro do motor. Com todos esses contratemplos o primeiro motor Stirling foi esquecido, visto que seu funcionamento não era possível. Diante disso, havia uma necessidade de se construir outro motor Stirling para se obter os resultados desejados.

Portanto, apesar das dificuldades encontradas na construção do primeiro motor Stirling com materiais recicláveis ainda é uma área de pesquisa promissora e constante

evolução. Com o passar dos anos, novos materiais e maneiras mais eficientes poderão tornar possível a construção de um motor Stirling de maneira mais funcional com materiais recicláveis.

Em conclusão, o primeiro motor Stirling feito por materiais recicláveis falhou. Contudo, não significa que a ideia de construir o motor Stirling de materiais recicláveis para geração de energia elétrica tenha sido descartada. A construção de um motor Stirling mais sustentável e amigável ao meio ambiente, é um desafio importante que deve ser explorado.

A partir do insucesso do primeiro motor Stirling, passamos para construção do segundo motor Stirling do tipo beta utilizando materiais recicláveis. Depois de construído o segundo motor de Stirling, foi necessário calcular seu rendimento para saber se o motor Stirling seria viável para geração de energia elétrica.

O rendimento de uma máquina térmica é definido como a relação entre o trabalho realizado pela máquina e a quantidade de calor que é fornecida a ela. Matematicamente, o rendimento pode ser expresso como:

$$\text{Rendimento} = (\text{Trabalho realizado}) / (\text{Calor fornecido}). \quad (14)$$

Considerando T_f a temperatura final do fluido após passar pela fonte de calor, T_q a temperatura da fonte de calor, T_{Kf} a temperatura final do fluido em Kelvin que é obtido adicionando 273 à temperatura graus Celsius, T_{Kq} a temperatura da fonte de calor em Kelvin e n o rendimento do processo em porcentagem, temos que o cálculo do rendimento em porcentagem é dado por:

$$\eta = 1 - (T_f/T_q) \quad (15)$$

O resultado tem que ser multiplicado por 100 para demonstrar o rendimento em porcentagem.

Nossos resultados mostram que a temperatura do fluido após passar pela fonte de calor é:

$$T_f = 60^\circ\text{C}. \quad (16)$$

Enquanto a temperatura da fonte de calor é:

$$T_q = 105^\circ\text{C} \quad (17)$$

Logo,

$$T_{Kf} = 273 + 60 = 333 K \quad (18)$$

e

$$T_{Kq} = 273 + 105 = 378 K \quad (19)$$

Portanto, o rendimento (n) é dado por:

$$n = 1 - \frac{333}{378} = 0,119 \quad (20)$$

logo,

$$n = 0,119 \times 100 \cong 11,9\% \quad (21)$$

Assim, após a construção do motor Stirling do tipo beta utilizando materiais recicláveis, foi concluído pela sua viabilidade para o desenvolvimento de energia elétrica e, nesse caso, apresentou um rendimento térmico 11.9%, considerado satisfatório.

Para comparar o rendimento térmico 11.9% com o rendimento elétrico de 1,28% do motor Stirling da pesquisa dos autores (DUARTE, TOLEDO e OLIVEIRA, 2013), ao confrontar os dois motores, deve-se notar que o motor Stirling com 11,9% apresenta uma ser significativamente mais eficiente em termos de conversão de energia térmica em energia mecânica do que o segundo.

Dessa forma, se um motor Stirling produzir uma maior quantidade de energia mecânica a partir da mesma quantidade de energia térmica fornecida ele será considerado mais eficiente em termos de conversão de energia térmica em energia mecânica. Essa afirmação também se aplica para a geração de energia elétrica.

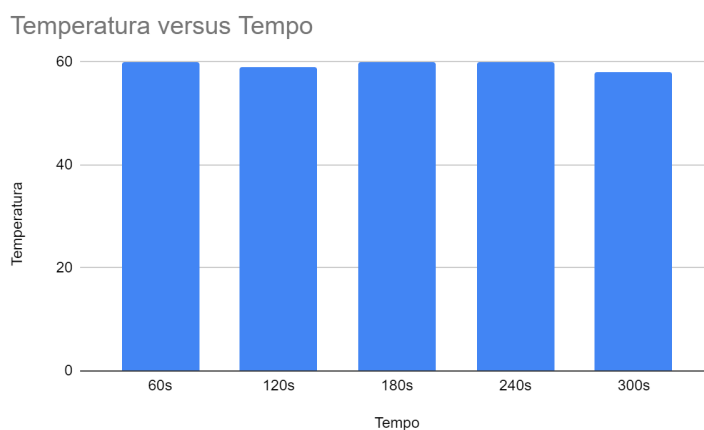
Concluindo, um motor Stirling com o rendimento térmico de 11,9% demonstra-se mais eficiente em converter energia térmica em trabalho mecânico do que um motor Stirling com o rendimento elétrico de 1,28%. Vale ressaltar que o rendimento elétrico pode ter mais importância em algumas aplicações, dependendo das particularidades específicas do sistema.

Comparando o rendimento térmico do motor Stirling 11,9% com o rendimento térmico de outro motor Stirling de 25,18% da pesquisa de (MATIAS, 2021), o motor Stirling dele é mais eficiente comparado ao motor construído nesta pesquisa. Isso significa que o motor de 25,18% pode realizar mais trabalho com a mesma quantidade de calor fornecida, consequentemente sendo mais viável para geração de energia elétrica.

Fazendo outra comparação de um rendimento térmico do motor Stirling da pesquisa de (SILVEIRA e FRAGA, 2019), cujo motor possui um rendimento térmico 37,8%. Demonstra que o motor Stirling construído por eles é mais eficiente para geração de energia elétrica que o desta pesquisa, na qual, possui um rendimento de 11,9%.

Na última comparação, o rendimento de 11,9% foi comparado à pesquisa do motor Stirling do (SOARES, 2018). O motor Stirling construído em seu trabalho demonstrou ser mais eficiente pois quanto maior o rendimento como mostrado anteriormente, a eficiência do motor Stirling é melhor, por esse motivo o fornecimento de energia elétrica dele vai ser melhor do que desta pesquisa.

Figura 11. Gráfico de temperatura da fonte fria

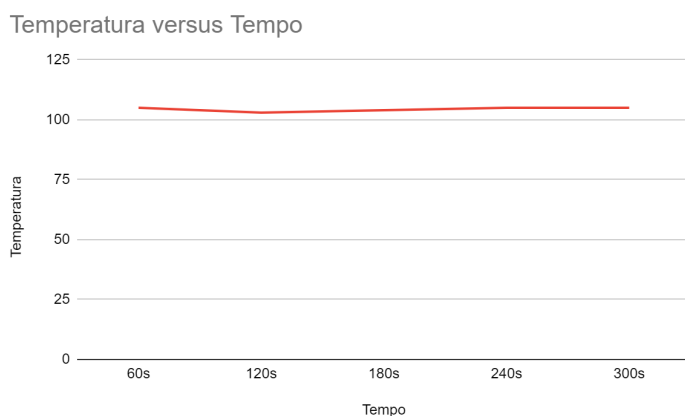


(FONTE:AUTOR)

De acordo como é mostrado com o gráfico em barra da temperatura da fonte fria, quanto mais adicionasse mais fonte de calor a temperatura aumenta elementos, isso demonstra que existe uma ligação direta entre adição de fontes de calor e o aumento da temperatura dos elementos em questão, conforme indicado pelo gráfico em barra da temperatura da fonte fria.

Em outras palavras, quanto mais fontes de calor forem adicionadas, maior será o aumento da temperatura da fonte fria, como apresentado no gráfico.

Figura 12. Gráfico de temperatura da fonte quente



(FONTE:AUTOR)

Como mostrado no gráfico de temperatura da fonte quente, o aumento da temperatura da fonte quente ocorre devido ao fornecimento de calor da fonte de calor. Isso significa que, ao fornecer calor, a fonte quente se torna mais quente à medida que mais calor é fornecido a ela pela fonte de calor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Finalizando o texto, apesar do primeiro motor Stirling ter encontrado dificuldades para produzi-lo, a ideia de se construir um motor Stirling reciclável para geração de energia elétrica é uma área de pesquisa promissora. O sucesso da evolução de novos recursos e técnicas mais eficientes podem beneficiar essa área, tornando o motor Stirling feito por materiais recicláveis de uma maneira mais funcional.

O desenvolvimento do segundo motor Stirling apresentou um funcionamento melhor do que o primeiro motor Stirling construído, demonstrando também um rendimento térmico melhor que o primeiro. Mesmo com um rendimento satisfatório de 11,9% ainda é considerado um rendimento baixo comparado aos motores Stirling apresentados no tópico anterior. Portanto, com esse rendimento pode se afirmar que a geração de energia elétrica dele é viável, no entanto, não é muito eficiente.

7. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. F. **DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DO MOTOR STIRLING MODELO ALFA**. Mossoró, 2017.: TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2017.

BARROS, R. W. E. A. **USO DE BIOMASSA COMO COMBUSTÍVEL PARA ACIONAMENTO DE MOTORES STIRLING**. [S.l.]: TCC (Graduação) - Curso de Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004., 2004.

BRUM, R. M. **Estudo de processos termodinâmicos reversíveis e irreversíveis**. Niterói: TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade Federal Fluminense, 2012.

CACHUTÉ, L. D. O. **ANÁLISE TEÓRICA E APRESENTAÇÃO DE METODOLOGIA DE PROJETO DE MOTOR STIRLING PARA USO EM SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO**. Taubaté: TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, 2006.

CASTOLDI, Igor Felipe de Amorim; FURLANETTO, Lucas de Bastos; HAMILTON, Matheus Henrique Izanfar. **Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling**. 2022. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Unicuritiba Campus Pinnheirinho, Curitiba, 2022.

CRUZ, V. G. D. **DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM MOTOR STIRLING TIPO GAMA**. João Pessoa, PB: Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2012.

DEUS, J. D. D. E. A. **Introdução à Física**. [S.l.]: Escolar Editora, 2014.

DUARTE, L. G. B.; TOLEDO, M.; OLIVEIRA, T. W. D. **CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO MOTOR STIRLING**. Curitiba, PR: TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. **Internal combustion engines: applied thermosciences**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

GIL, A. C. **COMO ELABORAR PROJETO DE PESQUISA**. São Paulo: Atlas, 2002.

GRASSELLI, E. C. **UMA ABORDAGEM DAS MÁQUINAS TÉRMICAS NO ENSINO DA TERMODINÂMICA SOB A ÓTICA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**. [S.l.]: Acesso em 10.jul.2022: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4446>., 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica**. 10^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2016.

LIMA, F. V. M. **Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling em Veículos Híbridos**. Santo André: 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2014.

MATIAS, A. K. S. **DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO DE MOTOR STIRLING GAMA SOLAR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**.

Recife, PE: TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, 2021.

MELO, D. C. X. S. D. **Motor Stirling como ferramenta de auxílio no aprendizado da Termodinâmica.** Natal, RN: TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics.** Danvers, MA: : John Wiley & Sons, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. B. D.; SANTOS, I. S. D.; SANTANA, R. C. R. E. E. A. **SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.** Aracaju - SE: TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tiradentes, 2021.

PAUTZ, E. R. **ESTUDO E PROJETO DE UM MOTOR STIRLING.** [S.l.]: TCC (Graduação) - Curso de Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul Panambi, 2013.

REIF, F. **Fundamentals of statistical and thermal physics.** [S.l.]: Waveland Press, 2009.
SANTOS, L. R. M. D.; CRUZ, F. A. D. O. **CICLOS TERMODINÂMICOS: UMA PROPOSTA DE ESTUDO MEDIADO POR APPLETS.** Rio de Janeiro. RJ: TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2017.

SILVEIRA, P. L. G. D. S.; FRAGA, F. E. N. **INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO PISTÃO REGENERADOR DO MOTOR STIRLING TIPO GAMA SOBRE A EFICIÊNCIA TÉRMICA EM UM PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO.** Mossoró, RN: TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, UFERSA, 2019.

SOARES, V. S. R. **CONFIGURAÇÃO DE UM MOTOR STIRLING GAMA E ANÁLISE OPERACIONAL.** Macaé, RJ: TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

VISERAS, S. C. B. **Diseño y estudio de implementación de un motor Stirling en las Lanchas de Instrucción.** Vigo: 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitario de La Defensa En La Escuela Naval Militar, 2016.

WALKER, G. **Stirling engines.** [S.l.]: Clarendon Press, 1980.