



## CONFIGURAÇÃO DE UM MOTOR STIRLING GAMA E ANÁLISE OPERACIONAL

Vitor Sacre Ribeiro Soares

Trabalho de Conclusão de  
Curso de Graduação submetido ao  
Corpo Docente da Engenharia  
Mecânica do Campus Macaé da  
Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do grau de  
Engenheiro Mecânico

Macaé - RJ  
Julho de 2018

CONFIGURAÇÃO DE UM MOTOR STIRLING GAMA E ANÁLISE  
OPERACIONAL

Vitor Sacre Ribeiro Soares

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO  
SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DA ENGENHARIA MECÂNICA DO  
CAMPUS MACAÉ DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Examinada por:

---

Prof. Diego Cunha Malagueta, D. Sc.  
Orientador – UFRJ Macaé

---

Prof<sup>a</sup>. Elisa Pinto da Rocha, D.Sc.  
Co-orientadora – UFRJ Macaé

---

Eng. Naiara Rinco  
Membro externo – UFRJ Macaé

---

Prof. Marcelo Silva, D.Sc.  
Membro interno – UFRJ Macaé

SOARES, Vitor Sacre Ribeiro.  
Configuração de um Motor Stirling Gama e  
análise operacional/ Vitor Sacre Ribeiro  
Soares - Macaé: UFRJ, 2018.

Orientador: Diego Cunha Malagueta  
Trabalho de Conclusão de Curso  
(graduação) – UFRJ-Macaé/ Engenharia  
Mecânica, 2018.

Este trabalho é dedicado à  
minha família que sempre me  
incentivou e apoiou durante toda a  
minha jornada acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, eles que sempre me apoiaram e guiaram em minha jornada acadêmica, me mostrando a importância do estudo em minha vida. Aos meus pais, Robson e Heloisa, pelo incentivo e permissão para a dedicação exclusiva aos meus estudos. Aos meus irmãos mais velhos, Juliana e Bruno, os quais me serviram de exemplo como alunos e profissionais.

Agradeço ao meu orientador Diego, que apesar das provas quilométricas de Máquinas Térmicas, me auxiliou na conclusão deste trabalho e me guiou durante o ciclo profissional do curso, não só dentro de sala, mas também fora dela. Agradeço também à minha co-orientadora Elisa, que embora tenha em parceria com Transferência de Calor me roubado algumas noites de sono, sempre esteve presente e se mostrou disponível quando precisei. Finalmente à ambos, por serem excelentes profissionais e acima de tudo humanos, sendo os dois os principais motivos por me interessar pelo “eixo” térmico do curso.

Aos meus amigos, eles que me acompanharam durante as matérias mais temidas, os trabalhos mais cansativos e as noites de estudos viradas. Um agradecimento especial à Nicole e ao Mateus, que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho durante a matéria “Projeto de Sistemas Térmicos”, sem eles a finalização do mesmo não seria possível.

Aos companheiros de oficina, local que me proporcionou trocas de conhecimento, em especial ao Newton, pelos ensinamentos técnicos e manipulação correta do maquinário do laboratório.

Por fim, a todos os professores que tive durante a graduação, os quais contribuíram para a formação do meu conhecimento e se mostraram bons amigos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado a Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

## CONFIGURAÇÃO DE UM MOTOR STIRLING GAMA E ANÁLISE OPERACIONAL

Vitor Sacre Ribeiro Soares

Julho/2018

Orientador: Diego Cunha Malagueta

Co-orientadora: Elisa Rocha

Curso: Engenharia Mecânica

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e construção de um Motor Stirling de configuração Gama e a análise operacional do mesmo. Primeiramente o motor foi contextualizado e seu funcionamento descrito. Os itens que compõem o motor, assim como a metodologia de montagem, foram destacados. Experimentou-se o motor desenvolvido utilizando combustíveis distintos, com o objetivo de calcular a eficiência do mesmo a partir de um estudo comparativo com a Máquina de Carnot. Para finalizar, os dados foram obtidos e curvas foram estudadas. As eficiências foram confrontadas com base em seus combustíveis e experimentos. Concluiu-se que a eficiência de Carnot permaneceu maior em ambos os casos, em contrapartida, a troca de combustíveis acarretou em diferentes resultados.

Palavras chave: Motor Stirling, Máquinas Térmicas, Máquina de Carnot, Eficiência Térmica.

Summary of the Undergraduate Project presented to the Federal University of Rio de Janeiro as part of the requirements required to obtain the degree of Mechanical Engineer.

## CONFIGURATION OF A STIRLING GAMA MOTOR AND OPERATIONAL ANALYSIS

Vitor Sacre Ribeiro Soares

July 2018

Adviser: Diego Cunha Malagueta

Co-Advisor: Elisa Rocha

Course: Mechanical Engineering

This work aimed to develop and construct a Gama configuration Stirling Motor engine and its operational analysis. First the engine was contextualized and its operation described. The items that compose the engine, as well as the assembly methodology, were highlighted. The engine was developed using different fuels, with the purpose of calculating the efficiency of the same from a comparative study with the Carnot Machine. To conclude, the data were obtained and curves were studied. Efficiencies were confronted based on their fuels and experiments. It was concluded that the efficiency of Carnot remained greater in both cases, in contrast, the exchange of fuels led to different results.

Keywords: Stirling Engine, Thermal Machines, Carnot Machine, Thermal Efficiency.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 MOTIVAÇÃO.....	3
1.4 OBJETIVO GERAL .....	3
1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 HISTÓRICO .....	5
2.2 CONFIGURAÇÕES DO MOTOR STIRLING .....	7
2.2.1 MOTOR STIRLING BETA .....	7
2.2.2 MOTOR STIRLING ALFA .....	8
2.3 CONCEITOS TERMODINÂMICOS E FUNCIONAMENTO DO MOTOR STIRLING GAMA .....	10
2.4 MÁQUINA DE CARNOT E A RELAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA .....	12
2.5 APLICAÇÕES DO MOTOR STIRLING .....	14
<b>3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
3.1 ANÁLISE TEÓRICA .....	16
3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	21
3.2.1 LISTA DE MATERIAIS .....	22
3.2.2 CONTRUÇÃO DO MOTOR .....	22
3.2.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	32
<b>4 ANÁLISE DE DADOS .....</b>	<b>34</b>
4.1 EXPERIMENTO Nº 1 .....	34
4.2 EXPERIMENTO Nº 2 .....	37



4.3 ESTUDO DO RENDIMENTO .....	42
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Robert Stirling.....	5
<b>Figura 2:</b> Motor Stirling de configuração Beta. ....	7
<b>Figura 3:</b> Motor Stirling de configuração Alfa.....	9
<b>Figura 4:</b> Motor Stirling de configuração Gama.....	11
<b>Figura 5:</b> Diagramas P x V e T x s do ciclo Stirling.....	11
<b>Figura 6:</b> Ciclo de Carnot ideal. ....	13
<b>Figura 7:</b> Posição do virabrequim no instante referente ao processo 1.....	17
<b>Figura 8:</b> Posição do virabrequim no instante referente ao processo 2.....	18
<b>Figura 9:</b> Posição do virabrequim no instante referente ao processo 3.....	19
<b>Figura 10:</b> Posição do virabrequim no instante referente ao processo 4.....	21
<b>Figura 11:</b> Pistão deslocador. ....	23
<b>Figura 12:</b> Vista isométrica transparente do pistão deslocador (ANEXO 1)...	24
<b>Figura 13:</b> Cilindro de expansão.....	25
<b>Figura 14:</b> Vista isométrica transparente do cilindro de expansão (ANEXO 2). .....	25
<b>Figura 15:</b> Recipiente de água. ....	26
<b>Figura 16:</b> Vista isométrica transparente do recipiente de água (ANEXO 3)...	27
<b>Figura 17:</b> Cabeçotes do pistão de expansão. ....	27
<b>Figura 18:</b> O forno do motor. ....	28
<b>Figura 19:</b> O volante do motor. ....	29
<b>Figura 20:</b> Cilindro de compressão e pistão de trabalho. ....	30
<b>Figura 21:</b> Vista isométrica transparente do cilindro de compressão (ANEXO 4). ....	30
<b>Figura 22:</b> Versão final do Motor Stirling Gama desenvolvido.....	31
<b>Figura 23:</b> Vista isométrica do conjunto de configuração Gama (ANEXO 5). .	32
<b>Figura 24:</b> Cat Phaser Laser Tacômetro Digital 1U-7771.....	33
<b>Figura 25:</b> Multímetro Digital Minimapa ET-1400. ....	33
<b>Figura 26:</b> Temperatura fria versus tempo. ....	35
<b>Figura 27:</b> Análise da temperatura quente em função do tempo.....	36
<b>Figura 28:</b> Rotação em função do tempo. ....	37
<b>Figura 29:</b> Análise da temperatura fria em função do tempo.....	38

<b>Figura 30:</b> Temperatura quente versus tempo. ....	39
<b>Figura 31:</b> Rotação em função do tempo. ....	40
<b>Figura 32:</b> Estudo comparativo entre as propriedades analisadas no primeiro experimento.....	41
<b>Figura 33:</b> Estudo comparativo entre as propriedades analisadas no segundo experimento.....	41
<b>Figura 34:</b> Rendimentos pontuais do experimento 1. ....	43
<b>Figura 35:</b> Rendimentos pontuais do experimento 2. ....	43

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 0:</b> Lista de materiais. ....	22
<b>Tabela 1:</b> Análise estatística da temperatura fria. ....	34
<b>Tabela 2:</b> Análise estatística da temperatura quente. ....	35
<b>Tabela 3:</b> Análise estatística da rotação.....	36
<b>Tabela 4:</b> Análise estatística da temperatura fria. ....	37
<b>Tabela 5:</b> Dados estatísticos da temperatura quente.....	39
<b>Tabela 6:</b> Análise estatística da rotação.....	39

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os motores a combustão foram inventados para aprimorar os processos de produção nas indústrias com o objetivo de melhorar o custo benefício, isso se deu em função da Revolução Industrial quando a competição entre as indústrias se tornou ainda mais competitiva, ou seja, tendo um melhor aperfeiçoamento da produção, a empresa estaria sempre à frente das demais. Com o advento da Revolução, a degradação ambiental foi crescente e desenfreada durante os séculos XIX e XX, com impactos evidentes no século XXI – poluição atmosférica, contaminação da água e do solo, desmatamento de florestas, o que tornou sombrias as futuras previsões para uma vida saudável no planeta.

Diante deste cenário, novos equipamentos surgiram com o objetivo de minimizar a emissão de poluentes e conseqüentemente os danos ao meio ambiente, entre as soluções inovadoras, surgiu o Motor Stirling.

De acordo com Walker (1980), o Motor Stirling é uma máquina térmica que opera em um circuito fechado. Ele trabalha com processos baseados na transferência de calor, ou seja, a partir do calor é capaz de gerar potência.

É classificado como um motor de combustão externa, portanto deve obter externamente o calor necessário para o seu funcionamento. Como não há troca de fluido de trabalho durante seu funcionamento, não há necessidade da queima de um tipo específico de combustível, assim aumenta-se a gama de possibilidades de utilização de fontes térmicas.

Assim, Finkelstein (1959) caracteriza a eficiência do motor como sua principal característica, relatando que alguns protótipos foram construídos pela empresa holandesa Philips nas décadas de 1950 e 1960 com índices de 45% de eficiência (se aproximando de Carnot), superando os motores a gasolina, diesel e outras máquinas a vapor.

Dada a importância desta tecnologia, muitos pesquisadores estão desenvolvendo pesquisas acerca deste modelo motor.

Vinícius da Cruz (2012) desenvolveu um protótipo de Motor Stirling tipo Gama utilizando resistências elétricas como fonte de calor e um fluxo de água a

temperatura ambiente para o resfriamento do trocador de calor de compressão. Uma análise matemática foi feita a partir de um método baseado na compressão e expansão isotérmica de um gás ideal, implementada em programa computacional capaz de permitir a determinação da dependência entre os parâmetros construtivos e de funcionamento do motor.

Crestani (2016) realizou a construção de um Motor Stirling tipo Gama com elementos mecânicos mutáveis (providos da possibilidade de ajuste geométrico). O comparativo experimental indica o rendimento a cerca de 26% menor que o teórico. Finalmente, foi feita uma verificação entre o desvio do trabalho estimado pela equação analítica de Hirata.

O protótipo realizado por Crestani (2016) foi estudado por Souza (2017) com o objetivo de aprimorá-lo analisando a transferência de calor na câmara fria. A geometria da câmara fria foi simplificada com aproximações para facilitar os cálculos. Os resultados foram obtidos a partir de cálculos iterativos, fazendo um balanço de energia entre cada uma das regiões. Todo o processo do ciclo foi considerado como regime permanente.

Descrevendo os principais meios geradores de energia heliotérmica, Santos (2014) foca no sistema Disco Parabólico, este que utiliza o Motor Stirling na geração de potência, apresentando um estudo do motor e principais configurações e componentes, assim como seu ciclo termodinâmico. Por fim, é relatado o processo de construção de um Motor Stirling de carácter didático e experimental, apresentando os resultados finais dos cálculos para o seu funcionamento utilizando um concentrador teórico como fonte de calor.

Em virtude dos fatos e de toda a temática a respeito do uso de energia, nota-se a importância dos estudos relacionados ao Motor Stirling. A partir dos conhecimentos obtidos e pesquisados, um novo motor tipo Gama foi projetado e seu rendimento analisado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Robert Stirling foi capaz de encontrar a solução para um problema. As máquinas a vapor responsáveis pela emissão de gases poluentes e

protagonistas em acidentes industriais, muitas vezes fatais, poderiam ser substituídas pelo Motor Stirling.

Atualmente o uso do Motor Stirling por médias e grandes empresas já é uma realidade em muitos países, entre elas tem-se a Advanco, Boeing Company and Science Corporation/STM Corp, Cummins Engine Company, German company Schlaich, Bergermann/MERO, SOLO Kleinmotoren, WG Associates e entre outras.

Simultaneamente, grandes instituições de engenharia avançada como Universidades de Berkeley, Stanford, Harvard, MIT, Purdue de Alabama e Ohio, Oxford e Cambridge da Inglaterra, Politécnica de Zurich, São Petersburgo da Rússia, UN Nicosia da Turquia, UN Cape Town e UM Stellenbosch da África do Sul têm feito o mesmo (SOUZA, 2017).

Desta forma, espera-se que o trabalho sirva como incentivo para futuras pesquisas na área e aprimoramento de novas técnicas experimentais baseadas no Motor Stirling.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

A motivação para a realização deste trabalho partiu do interesse por motores e conhecimentos adquiridos na disciplina de máquina térmicas.

O Motor Stirling abrange diversos ramos de pesquisas, utilidades e propósitos a respeito de seu funcionamento. A escolha pelo tema consistiu na afinidade pelo ramo térmico da engenharia mecânica estudado ao longo do curso.

Além disso, os motores Stirling têm provado sua alta eficiência e capacidade de operar com diferentes combustíveis ou fonte de calor, assim são frequentemente utilizados como elemento no aproveitamento energético. Tais características implicaram na realização deste trabalho.

### 1.4 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e construção de um Motor Stirling modelo Gama, com base no modelo teórico de Robert Stirling, bem

como estimar o rendimento deste motor e confrontá-lo diretamente com o rendimento de uma máquina térmica de Carnot.

#### 1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Contextualizar teoricamente o motor modelo Stirling;
- Relacionar os rendimentos dos ciclos Carnot e Stirling;
- Contextualizar o processo de montagem do Motor Stirling de configuração Gama e o seu respectivo dimensionamento;
- Obter dados de rotação e temperatura experimentalmente;
- Experimentar diferentes combustíveis;
- Obter o rendimento;
- Confrontar dados experimentais com analíticos.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 foi realizada uma contextualização e introdução do tema do trabalho, mostra-se a justificativa e motivação que levaram à decisão do tema, além dos objetivos que desejam ser alcançados.

Posteriormente, no capítulo 2 foi feita a revisão bibliográfica do assunto, conceituando o Motor Stirling e contando brevemente sobre sua história. Foram destacadas as diferentes configurações de um Motor Stirling, com foco na configuração Gama. Além disso, foram relacionadas as eficiências dos ciclos Carnot e Stirling. Por fim, abordaram-se as aplicações para o motor.

Em seguida, no capítulo 3, descreveu-se o funcionamento operacional do motor em paralelo com os processos termodinâmicos do ciclo Stirling, além da metodologia adotada na construção do motor e sua experimentação.

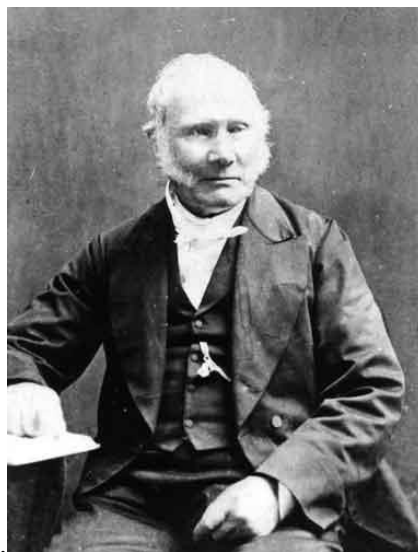
Para finalizar, o capítulo 4 analisou os dados obtidos através dos experimentos, permitindo a descrição do comportamento das temperaturas e da rotação no motor, além de conclusões acerca da mudança de combustível.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO

Segundo Pautz (2013), a famosa patente do Motor Stirling de n.º 4081, teve o título de: *“Improvements for Diminishing the Consumption of Fuel, and in Particular an Engine Capable of Being Applied to the Moving (of) Machinery on a Principle Entirely New – Melhora para Redução do Consumo de Combustível, e em Particular um Motor Capaz de ser Aplicado ao Movimento de Máquina com um Princípio Completamente Novo”*, e foi criada pelo escocês Robert Stirling (Figura 1) em 1816. E é de acordo com Barros (2005), descrito como o primeiro motor de ciclo fechado.



**Figura 1: Robert Stirling.**

Fonte: Hirata (1995).

O objetivo inicial dos irmãos, James e Robert Stirling, foi a substituição do motor a vapor, este que possui grande semelhança teórica e estrutural com o Motor Stirling. Foi criado em 1816 com a intenção de criar uma máquina térmica independente de caldeiras ou vasos de pressão. A ideia consistia em converter qualquer diferença de temperatura em movimento e trabalho (DARLINGTON e STRONG, 2005).

Robert Stirling dedicou o resto de sua carreira científica ao desenvolvimento e aperfeiçoamento desse motor. Ao final de sua vida, como reportado por Walker (1980), Stirling atribuiu a limitação de seu motor à capacidade dos materiais suportarem altas temperaturas e previu grande utilização para esses motores, visto o iminente desenvolvimento de novos materiais.

O Motor Stirling utilizava ar, ao invés de vapor, como fluido de trabalho. Desta forma, minimizava o risco de explosão dos motores a vapor, fator comum naqueles dias. As caldeiras a vapor explodiam frequentemente fazendo vítimas, devido a problemas de projeto, má qualidade dos materiais, ausência de regras e metodologias de utilização e manutenção. Foram esses acidentes, aliados às descobertas científicas e tecnológicas, que levaram Robert Stirling a imaginar um motor sem caldeira, submetido a fortes pressões.

O dispositivo Stirling foi utilizado pela primeira vez em 1818 para bombear água para uma pedreira, foi capaz também de retirar água de poços (BARROS, 2005).

Tal motor se difere dos motores de combustão interna e dos motores a vapor. Ele é capaz de utilizar qualquer fonte de calor como combustível. Teoricamente, ele possui uma alta eficiência energética.

Além disso, é uma máquina térmica que opera a partir de uma compressão cíclica e da expansão de ar (ou outro fluido de trabalho) a temperaturas distintas, convertendo de forma líquida, o calor em trabalho mecânico.

A semelhança que existe em todas as máquinas térmicas é constituída pela compressão do gás frio, pelo aquecimento do mesmo, e pelo arrefecimento do gás antes da repetição do ciclo.

Nos motores Stirling em geral, deve-se ter dois espaços com temperaturas distintas, com o gás de trabalho fluindo de um para o outro. Tal movimento é realizado pelo deslocador e por dois pistões, um de expansão e outro de compressão (HIRATA, 2013).

## 2.2 CONFIGURAÇÕES DO MOTOR STIRLING

Neste tópico serão apresentadas duas configurações para o Motor Stirling e seus processos termodinâmicos teóricos serão descritos.

Existem três grupos que dividem os tipos de motores Stirling, Alfa, Beta e Gama, suas características se diferem com a configuração dos cilindros e pistões. Para o funcionamento do motor é preciso quatro processos para a geração de potência: compressão a temperatura constante, aquecimento a volume constante, expansão a temperatura constante e rejeição de calor a volume constante.

### 2.2.1 MOTOR STIRLING BETA

O Motor Stirling Beta é constituído por um único cilindro de dois pistões alinhados no mesmo, onde o pistão interno desloca o fluido de trabalho entre a câmara “quente e fria”. O segundo pistão, conhecido como pistão de trabalho tem a função de manter suspenso o pistão deslocador, responsável pelo trabalho do motor.

O Motor Beta apresenta a configuração clássica de 1816, patenteada por Robert Stirling. A Figura 2 apresenta o esquema do motor citado.

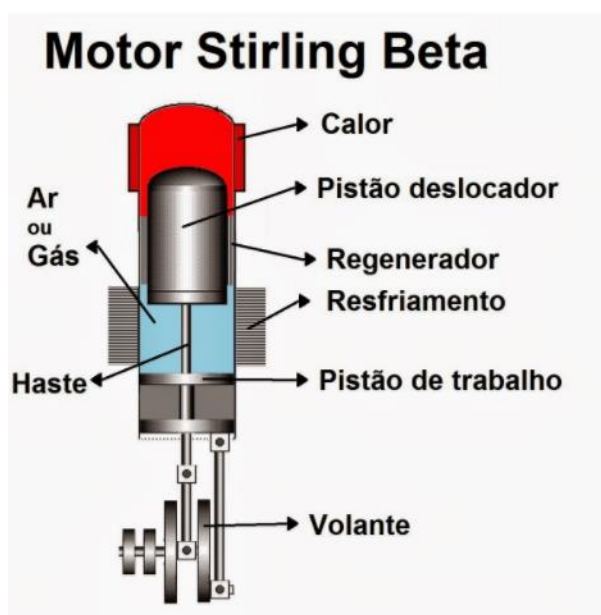


Figura 2: Motor Stirling de configuração Beta.

Fonte: Wagner (2014).

O ciclo Stirling Beta é definido em quatro processos:

1 – 2: O pistão de trabalho é movimentado para cima e o gás é comprimido. O gás é resfriado através do circuito de água de resfriamento, com o objetivo de realizar a compressão a temperatura constante;

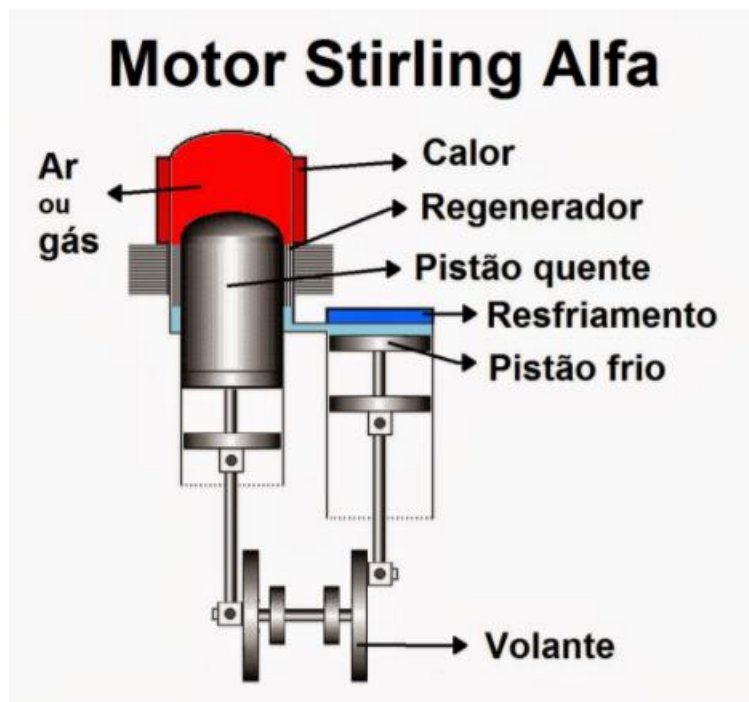
2 – 3: O pistão de deslocamento é movimentado para baixo, forçando o gás a passar através do canal de conexão para o volume quente, onde o gás é aquecido por um queimador. Quando o gás é aquecido, sua pressão aumenta. Porém é importante notar que o volume nesse processo é constante;

3 – 4: Ambos os pistões movimentam para cima, devido à expansão do gás. O gás é aquecido pelo exterior por um queimador com o objetivo de se obter uma expansão a temperatura constante;

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

### 2.2.2 MOTOR STIRLING ALFA

O modelo Alfa possui um funcionamento diferenciado quando comparado aos mencionados anteriormente. Este é constituído por dois cilindros independentes, onde o pistão quente se responsabiliza pela produção do movimento mecânico gerado pela variação de pressão e vácuo interno do motor. Os dois pistões em conjunto comprimem o gás de trabalho no espaço frio, movimentando o gás para o espaço quente onde ele é expandido, voltando para a parte fria (MARTINI, 1983). Diferentemente dos motores citados, o pistão quente é visível, conforme a Figura 3.



**Figura 3: Motor Stirling de configuração Alfa.**

Fonte: Wagner (2014).

O pistão frio realiza a compressão e expansão do fluido de trabalho. Este modelo possui dois cilindros em paralelo.

Portanto os processos são descritos da seguinte forma:

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

3 – 4: Neste processo, ambos os pistões (compressão e expansão) se movem para baixo, expandindo o fluido de trabalho e realizando trabalho. Este processo é realizado a temperatura constante, sendo que durante a expansão, o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;

4 – 1: O pistão de compressão se movimenta até o ponto morto inferior, enquanto o pistão expansão se movimenta para cima. Com isso, o fluido de

trabalho passa para o espaço de compressão, tendo calor rejeitado pelo sistema de resfriamento, reduzindo a sua pressão até a condição 1.

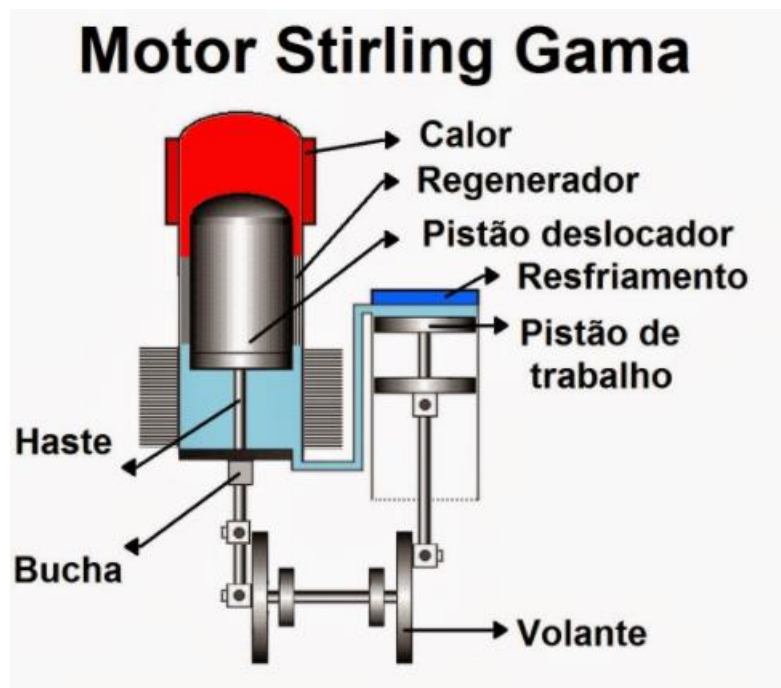
### 2.3 CONCEITOS TERMODINÂMICOS E FUNCIONAMENTO DO MOTOR STIRLING GAMA

O motor desenvolvido e estudado neste trabalho trata-se de um Stirling em configuração Gama, utilizando o ar como fluido de trabalho.

De acordo com Martini (2004) o ciclo Stirling é definido como uma sequência de processos de compressão e expansão isotérmicas de um gás, com seu aquecimento e resfriamento a volume constante.

No entanto, segundo Walker (1980) um Motor Stirling é um dispositivo mecânico capaz de operar um ciclo termodinâmico regenerativo fechado, com compressão e expansão cíclica do fluido de trabalho em diferentes temperaturas.

De acordo com Kongtragool (2003), a configuração Gama com dois pistões é a que possui maior rendimento. Esta configuração é constituída por dois cilindros separados, cada um contendo seu pistão, que estão conectados entre si. O pistão deslocador faz o deslocamento do fluido de trabalho entre as extremidades “quente e fria”, este é suspenso por uma haste deslizante pelo centro do cilindro quente, o pistão é completamente isolado e confinado do ambiente externo, conforme a Figura 4.



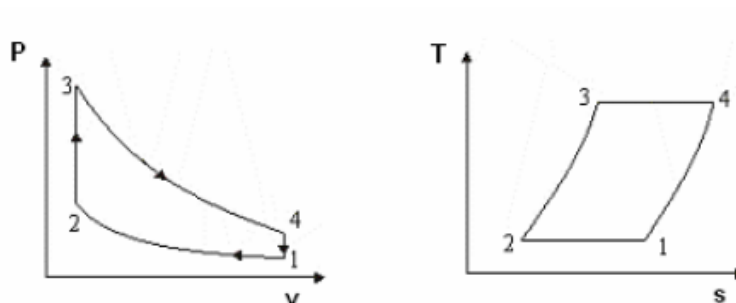
**Figura 4: Motor Stirling de configuração Gama.**

Fonte: Wagner (2014).

Este formato tem o intuito de separar a parte quente do trocador de calor, associada ao pistão deslocador, do espaço de compressão, associada ao pistão de trabalho (MELLO, 2001).

Quando comparado ao tipo Beta, o Gama possui uma configuração mais simples e ajustes na taxa de compressão e incremento da área de transferência de calor são relativamente fáceis de obter (HIRATA, 2013).

Portanto, o ciclo Stirling pode ser definido por dois processos isotérmicos e dois processos isocóricos. A Figura 5 mostra a distribuição dos processos do ciclo Stirling ideal.



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

Fonte: Sonntag (2009)

De acordo com os diagramas, calor é transferido ao fluido de trabalho durante o processo a volume constante 2-3, da mesma forma durante o processo de expansão isotérmica 3-4. Calor é transferido do fluido de trabalho durante o processo a volume constante 4-1 e durante o processo de compressão isotérmica 1-2 (SONNTAG, 2009).

## 2.4 MÁQUINA DE CARNOT E A RELAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA

Estudada por Sadi Carnot por volta de 1820, a máquina de Carnot é uma máquina ideal que utiliza calor para realizar um trabalho. Ela contém um gás sobre o qual se exerce um processo cíclico de expansão e compressão entre duas temperaturas.

Elielzer (2013) relata que Carnot mostrou que quanto maior a temperatura da fonte quente, maior seria seu rendimento para uma substância com o comportamento de um gás ideal. Portanto tem-se os processos que formam o ciclo descritos pela Figura 6.

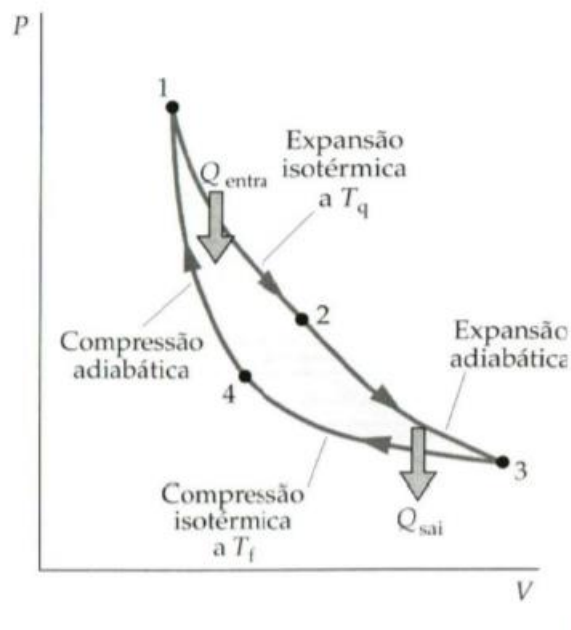
1-2 Expansão isotérmica: onde o gás retira energia térmica da fonte quente;

2-3 Expansão adiabática: onde o gás não troca calor;

3-4 Compressão isotérmica: onde o gás rejeita energia térmica para a fonte fria;

4-1 Compressão adiabática: onde o gás não troca calor.





**Figura 6 : Ciclo de Carnot ideal.**

Fonte: Tipler (2012)

De acordo com Kongtragool (2003), uma das vantagens apresentadas pelo ciclo Stirling ideal é que a eficiência térmica do ciclo com regeneração ideal é igual à obtida pelo ciclo de Carnot, operando entre as mesmas temperaturas. Durante o curso do cilindro, o regenerador que armazena temporariamente a energia sob forma de calor, rapidamente absorve e libera calor para o gás. Portanto, a quantidade de calor tomada da fonte externa é reduzida, tendo como resultado o aumento da eficiência térmica.

No ciclo Stirling, um regenerador cuja eficiência é de 100% permite que o calor rejeitado durante o processo de transferência de calor a volume constante (4-1) possa ser usado como a entrada de calor no processo de aquecimento isocórico (2-3). Podendo ser concluído que a eficiência térmica do ciclo de Stirling é fornecido pela mesma expressão da eficiência térmica do ciclo de Carnot (CARRIL e FRANCO, 2016), como mostra a equação 1.

$$n = \frac{(T_1 - T_3)}{T_1} = \frac{T_q - T_l}{T_q} = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (1)$$

Onde  $T_1$  e  $T_3$  são as temperaturas equivalentes a temperatura quente e fria, respectivamente, referentes ao ciclo Stirling, mostradas no diagrama da Figura 5.

## 2.5 APLICAÇÕES DO MOTOR STIRLING

A aplicação de um Motor Stirling pode ser dividida em três categorias: propulsão mecânica, aquecimento e arrefecimento e sistemas de geração de energia. Para sistemas de energia submersa, utiliza-se em motores de Propulsão Independente do Ar (AIP), utilizados em submarinos. Capaz de acionar sistemas elétricos, em novembro de 2007, um protótipo de um carro híbrido usando biocombustível, alimentado por um Motor Stirling, foi anunciado na Suécia (MOTOR, 2018).

Segundo *Sandia National Laboratories and Stirling Energy Systems* (SES), engenheiros do laboratório Sandia, nos Estados Unidos, foram capazes de alcançar o recorde mundial na eficiência da conversão de energia solar para eletricidade através de espelhos parabólicos com o auxílio de motores Stirling.

O método consiste na utilização de um prato solar capaz de gerar eletricidade, concentrando os raios do sol em um receptor, que transmite a energia térmica para um Motor Stirling. O motor é um sistema fechado com hidrogênio. À medida que o gás aquece e esfria, sua pressão varia. A mudança na pressão aciona os pistões dentro do motor, produzindo energia mecânica, que por sua vez aciona um gerador e produz eletricidade.

Dentello (2017) introduz o Motor Stirling apresentando suas principais características e vantagens. Seu trabalho objetiva o estudo das performances de um Motor Stirling operando com sistema de alimentação a biogás (utilizando um compressor) e energia solar (utilizando um concentrador parabólico), aplicado para a geração de energia elétrica descentralizada. Os resultados finais mostraram uma eficiência de 67%. Analisando economicamente, fica claro que um maior número de horas de operação implica uma viabilidade econômica.

É concluído que o uso de fontes renováveis permitem bons níveis de eficiência de geração de energia elétrica de sistemas utilizando motores Stirling de pequeno porte, reduzindo níveis de poluição atmosférica.

O conversor de potência Stirling de pistão livre é uma tecnologia promissora, a NASA (2017) publica a respeito da utilização deste conversor com a finalidade de gerar energia de alta eficiência de calor para eletricidade no espaço. Estes conversores normalmente utilizam alternadores lineares para converter movimento mecânico em eletricidade. O alternador linear é um dos componentes mais pesados dos modernos conversores de potência Stirling.

Além disso, os alternadores lineares Stirling normalmente requerem o uso de capacitores de sintonização ou controladores ativos de correção do fator de potência para maximizar a potência de saída do conversor. O alternador linear a ser discutido neste artigo elimina a necessidade de sintonizar capacitores e fornecer saída de energia elétrica na qual a corrente está inerentemente em fase com a tensão. Nenhuma correção do fator de potência é necessária.

Este conceito é um design exclusivo de bobina móvel onde o caminho do fluxo magnético é definido pelos próprios ímãs. O artigo mostra previsões computacionais para duas configurações diferentes de alternador de baixa indutância e compara as previsões com dados experimentais para uma das configurações que foram construídas e estão sendo testadas atualmente.

Portanto é confirmada a grande amplitude da qual é possível utilizar o Motor Stirling.

### **3 MATERIAIS E METODOLOGIA**

Nesta seção será feita uma análise do comportamento do motor em sintonia com o ciclo teórico de Stirling. Os itens utilizados para o desenvolvimento das partes vitais do motor serão descritos, e como eles devem ser manipulados para a construção das mesmas. Por fim, o procedimento experimental será explicado.

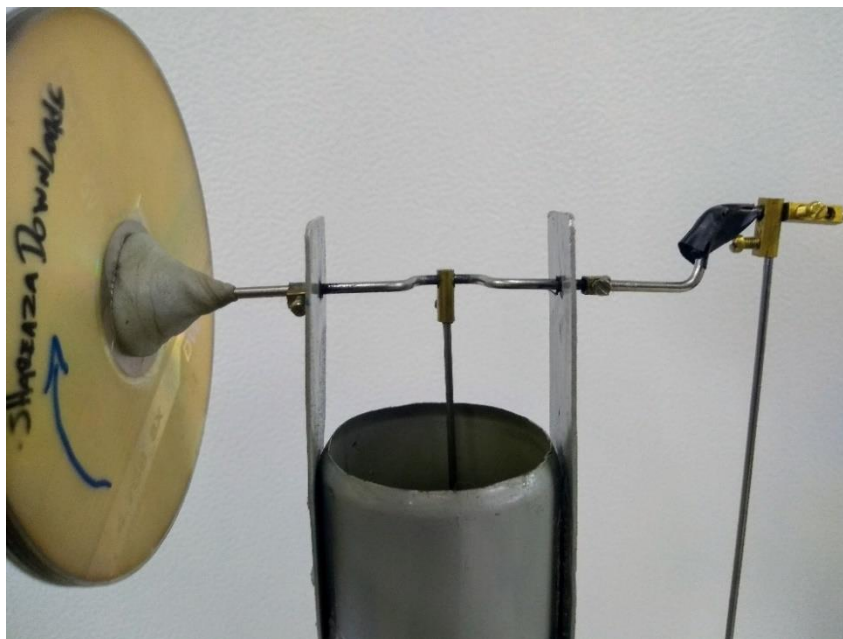
### 3.1 ANÁLISE TEÓRICA

Os processos termodinâmicos do ciclo Stirling serão representados acompanhados de figuras que relacionam tais processos com as posições do virabrequim construído.

1-2 Compressão isotérmica: Consiste na liberação de calor na região do trocador de calor de baixa temperatura ou região fria. Devido ao aumento da pressão do gás, este aplica uma força no pistão de trabalho, movimentando-o para cima, conforme a Figura 7. Assim, realiza-se trabalho de compressão e absorve-se calor da fonte quente, simultaneamente. Como a variação de temperatura é nula, tem-se a variação de energia interna nula como consequência, ou seja  $\Delta U = 0$ . Logo o balanço de energia é fornecido pela equação 2.

$$q_{1-2} = nRT \ln\left(\frac{V_1}{V_4}\right) \quad (2)$$

Onde  $q_{1-2}$  é a energia térmica referente a curva do processo 1 ao 2,  $n$  a quantidade de substância do gás,  $R$  a constante de gás ideal,  $T$  a temperatura,  $V_1$  e  $V_4$  os volumes nos pontos 1 e 4, respectivamente.



**Figura 7: Posição do virabrequim no instante referente ao processo 1.**

Fonte: o autor (2018).

2-3 Aquecimento isocórico: É um processo de transferência de calor a volume constante, o pistão de deslocamento é movimentado para baixo, conforme a Figura 8, fazendo com que o fluido de trabalho passe para o espaço de expansão, recebendo calor da fonte externa, tal calor é representado pela equação 3. Temos, portanto, um aumento de temperatura de  $T_l$  para  $T_h$  e um aumento da pressão;

$$q_{2-3} = q_h = nC_v(T_q - T_f) \quad (3)$$

Como o volume é constante, implica-se que  $W = 0$ .

Onde  $W$  é o trabalho produzido,  $q_h$  o calor fornecido ao ciclo,  $c_v$  o calor específico a volume constante,  $T_q$  e  $T_f$  as temperaturas quente e fria, respectivamente.

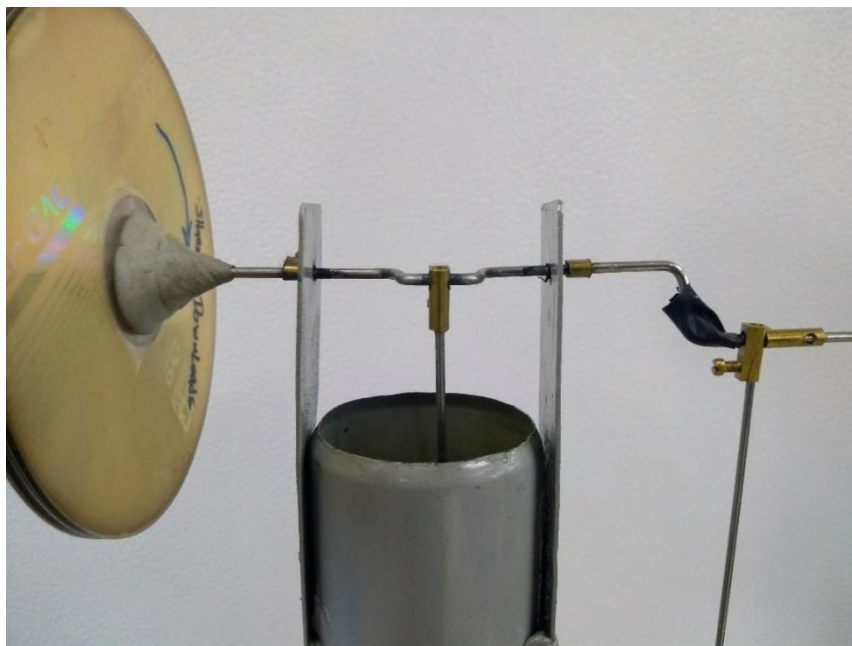
Nesta condição o pistão deslocador encontra-se na posição de ponto morto inferior.



**Figura 8: Posição do virabrequim no instante referente ao processo 2.**

Fonte: o autor (2018).

3-4 Expansão isotérmica: Com o aumento da pressão do motor, é representado pela Figura 9, o pistão de trabalho movimentado para baixo. Absorve-se calor na região do trocador de calor de alta temperatura, com liberação de energia mecânica.



**Figura 9: Posição do virabrequim no instante referente ao processo 3.**

Fonte: o autor (2018).

Para compreender a energia do sistema é preciso ter como ponto de partida a equação 4, que descreve a Primeira Lei da Termodinâmica, portanto tem-se:

$$\Delta U = Q - W \quad (4)$$

Onde  $\Delta U$  representa a variação de energia interna.

Nesta etapa o gás se encontra a uma pressão inferior, sendo assim empurrado pelo ar exterior, ou seja, é exercido trabalho e enquanto isso calor é dissipado para o exterior, portanto:

$$\Delta U = 0 \quad (4.1)$$

$$Q = W \quad (4.2)$$

O trabalho pode ser escrito como:

$$W = \int dW = \int_{v_i}^{v_f} P dV \quad (5)$$

Onde  $P$  é a pressão,  $dW$  a variação do trabalho,  $dV$  a variação do volume,  $v_i$  e  $v_f$  são o volume inicial e final, respectivamente.

De acordo com a lei dos gases ideais,

$$PV = nRT \quad (6)$$

Como é um processo isotérmico, temos:

$$P = nRT \frac{1}{V} = K \frac{1}{V} \quad (7)$$

Onde  $K$  é uma constante qualquer.

Substituindo a equação 8 na equação 6 tem-se:

$$W = nRT \ln \left( \frac{v_f}{v_i} \right) \quad (8)$$

Finalmente,

$$q_{3-4} = nRT \ln \left( \frac{V_3}{V_2} \right) \quad (9)$$

Onde  $q_{3-4}$  é a energia térmica referente à curva do processo 3 ao 4,  $V_2$  e  $V_3$  os volumes nos pontos 2 e 3, respectivamente.

4-1 Transferência de calor a volume constante: Neste processo o pistão de deslocamento é movimentado para cima, fazendo com que o fluido de trabalho passe para o espaço de compressão, rejeitando calor para o sistema de resfriamento, este calor é descrito pela equação 10. Finalmente, é reduzida a pressão do sistema até a condição 1, retomando o ciclo.

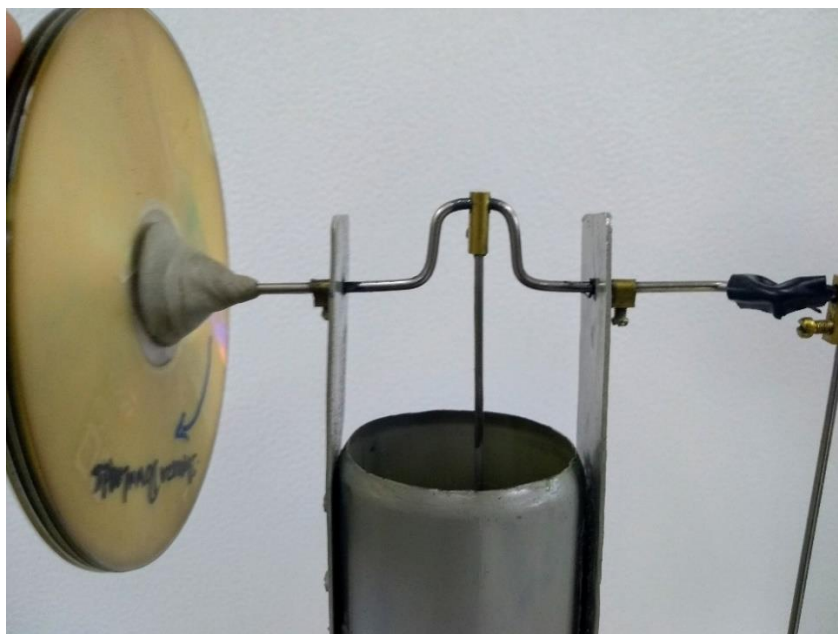


Novamente, o volume constante implica que o trabalho seja nulo, ou seja,  $W = 0$ .

$$q_{4-1} = q_l = nC_v(T_f - T_q) \quad (10)$$

Onde  $q_l$  é dito o calor rejeitado pelo ciclo.

Tal condição mantém o pistão deslocador na posição de ponto morto superior, representada pela Figura 10.



**Figura 10: Posição do virabrequim no instante referente ao processo 4.**

Fonte: o autor (2018)

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste tópico a metodologia de construção do motor desenvolvido é explicada acompanhada de desenhos técnicos. Finalmente, o procedimento experimental para a obtenção de dados é descrito.

### 3.2.1 LISTA DE MATERIAIS

A tabela abaixo mostra a lista de materiais necessários para a construção e desenvolvimento do motor.

**Tabela 0: Lista de Materiais.**

UNIDADE(S)	ITEM
4	LATA DE INSETICIDA
1	LATA DE ERVILHA
1	LATA DE PÊSSEGO
2	LATA DE RED BULL
1	LUVA PVC DE 20
1	JOELHO DE PVC 20
1	BUCHA DE PVC 25X32
1	BUCHA DE PVC 32X40
1	BUCHA DE PVC 40X50
2	RAIO INOX DE BICICLETA 2mm
2	RAIO INOX DE BICICLETA 2,5mm
4	CD
1	ABRAÇADEIRA
2	MOEDAS DE 5 CENTAVOS
2	TAMPAS DE PRODUTOS DE LIMPEZA
1	BALÃO DE FESTA
8	CONECTOR DE FIO
1	BISNAGA DE SILICONE DE ALTA TEMPERATURA
1	SOLDADOR DE ESTANHO E SOLDA DO MESMO
1	DUREPOXI
1	COLA DE PVC

Fonte: Wagner (2013).

### 3.2.2 CONTRUÇÃO DO MOTOR

O processo da montagem foi realizado com auxílio de vídeos tutoriais do "Manual do Motor Stirling" (WAGNER, 2015). Foram utilizados itens simples na montagem do motor, como latas de inseticida, latas de ervilha e raios de bicicleta.

Como dito anteriormente, um Motor Stirling Gama se caracteriza pela composição de dois cilindros separados e dois pistões, se conectando entre si. O cilindro de expansão é o maior entre os dois, ele contém o pistão deslocador.

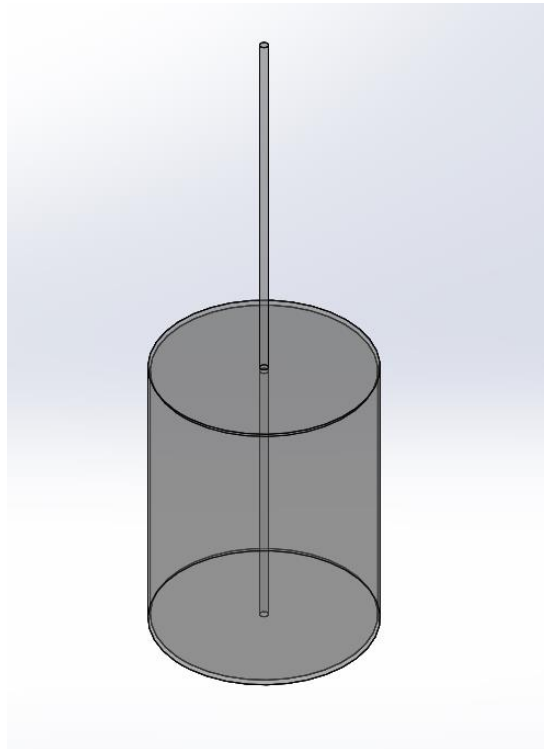
Na construção deste pistão utiliza-se uma lata de 53mm de diâmetro, cortada a uma altura de 70mm. Para guiar o cabeçote, um raio de bicicleta de 2mm de diâmetro e comprimento de 160mm atravessa a lata. Finalmente as partes são unidas com silicone de alta temperatura de acordo com a Figura 11.



**Figura 11: Pistão deslocador.**

Fonte: Wagner (2014).

A Figura 12 representa o desenho técnico do pistão deslocador desenvolvido no Solidworks.



**Figura 12: Vista isométrica transparente do pistão deslocador (ANEXO 1).**

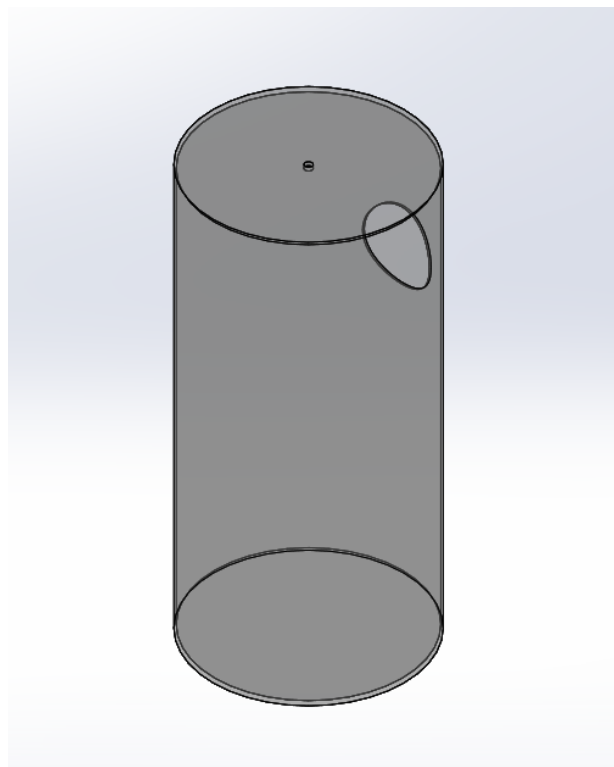
Fonte: o autor (2018).

Para a construção do cilindro de expansão, em que o pistão deslocador é contido, utiliza-se uma lata de 57mm de diâmetro, um corte deve ser feito de maneira que a altura do cilindro seja de 120mm. Por fim, faz-se um corte de 20mm de diâmetro na lateral da lata, este que servirá para acoplar um joelho, capaz de conectar os dois cilindros do motor, conforme a Figura 13. A Figura 14 desenvolvida ilustra o cilindro.



**Figura 13: Cilindro de expansão.**

Fonte: Wagner (2014).



**Figura 14: Vista isométrica transparente do cilindro de expansão (ANEXO 2).**

Fonte: o autor (2018).

O cilindro de expansão também é caracterizado pela troca de calor que nele ocorre. Esta troca é auxiliada por um recipiente de água, que cobre parte da parede do cilindro. Com uma lata de 73mm de diâmetro cortada ao meio, faz-se o item citado.

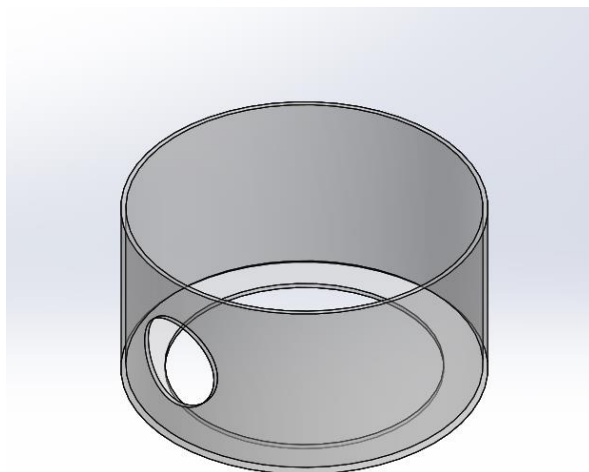
Na lateral do mesmo, deve ser feito um corte de formato cilíndrico, permitindo a passagem do mesmo joelho, dito anteriormente. Corta-se o fundo deste recipiente com a medida do cilindro de expansão para que este cubra a parede do cilindro externamente com água. A Figura 15 mostra o recipiente do motor desenvolvido.



**Figura 15: Recipiente de água.**

Fonte: o autor (2018).

Para uma melhor visualização, a Figura 16 mostra o desenho técnico do recipiente.



**Figura 16: Vista isométrica transparente do recipiente de água (ANEXO 3).**

Fonte: o autor (2018)

O cilindro de expansão deve ser selado, por isso dois cabeçotes, representados pela Figura 17, são soldados ao cilindro. Além de vedar o sistema, são responsáveis por guiar, a partir de pequenos furos, o raio de bicicleta que atravessa o pistão deslocador. Ambos cabeçotes possuem mesmo diâmetro que o cilindro, porém com um corte na altura de 50mm.



**Figura 17: Cabeçotes do pistão de expansão.**

Fonte: Wagner (2014).

O forno é o responsável por armazenar o calor do sistema. Sua construção consiste em uma lata de 100mm de diâmetro. Sua base foi completamente retirada, e sua lateral cortada, possibilitando a entrada do álcool e da estopa. A tampa, na parte superior, teve um corte de circunferência correspondente ao diâmetro do cilindro de expansão para o encaixe. Para unir o cilindro ao forno, conforme a Figura 18 mostra, foi realizada uma solda oxiacetilênica com vara de metal, devido a fina espessura das latas. As demais soldas foram realizadas com ferro de solda.

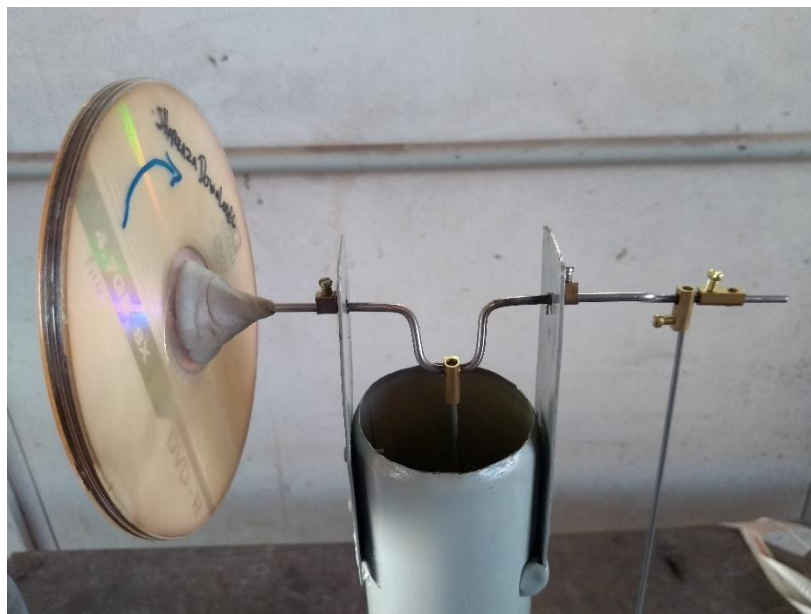


**Figura 18: O forno do motor.**

Fonte: o autor (2018).

O principal responsável pelo deslocamento dos dois pistões é o volante. Localizado na extremidade do motor, é composto por um virabrequim de raio de bicicleta de 65mm de comprimento. Fez-se dois cursos, cada um conectado a um pistão, como mostra a Figura 19.





**Figura 19: O volante do motor.**

Fonte: o autor (2018).

Na extremidade do volante tem-se quatro CD's unidos com cola, é nesta extremidade que se dá a partida inicial do motor.

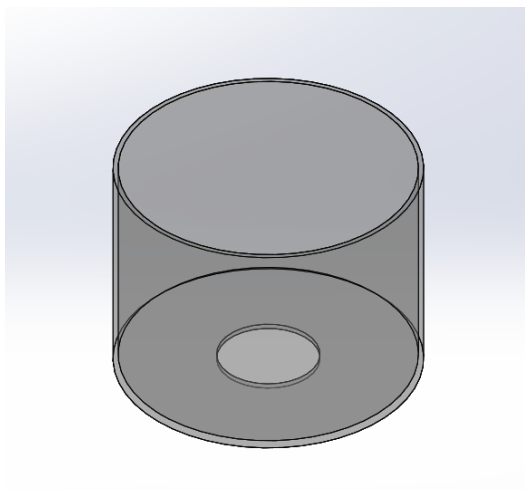
O cilindro de compressão (Figura 20) é formado por três buchas PVC concêntricamente encaixadas de 25x32, 32x40 e 40x50, cortadas ao meio. O cilindro é selado com uma bexiga e duas tampas, uma na parte interna e outra na externa do cilindro, ambas de plástico e 35mm de diâmetro, que formam o pistão de trabalho. Para evitar qualquer tipo de vazamento de ar, foi utilizada uma abraçadeira.



**Figura 20: Cilindro de compressão e pistão de trabalho.**

Fonte: o autor (2018).

A Figura 21 representa o desenho técnico do cilindro de compressão.



**Figura 21: Vista isométrica transparente do cilindro de compressão (ANEXO 4).**

Fonte: o autor (2018).

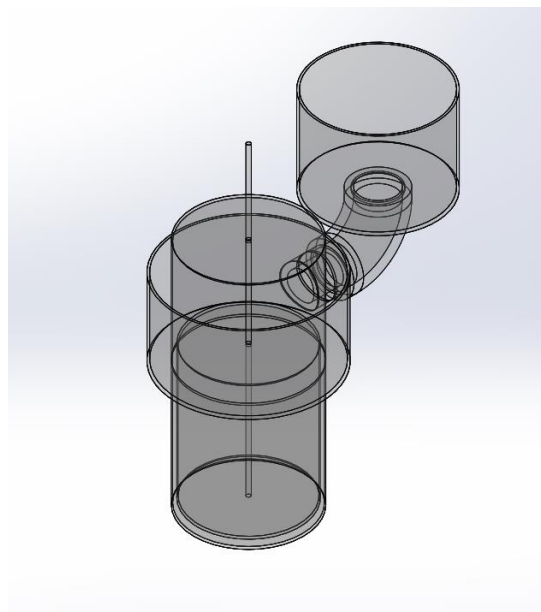
Os elementos descritos são cruciais para o funcionamento do motor, quando unidos, resulta-se como produto final o Motor Stirling Gama, conforme a Figura 22.



**Figura 22: Versão final do Motor Stirling Gama desenvolvido.**

Fonte: o autor (2018).

O desenho técnico da Figura 23 mostra o conjunto dos cilindros de expansão e compressão, assim como o pistão deslocador, caracterizando a configuração Gama.



**Figura 23: Vista isométrica do conjunto de configuração Gama (ANEXO 5).**

Fonte: o autor (2018).

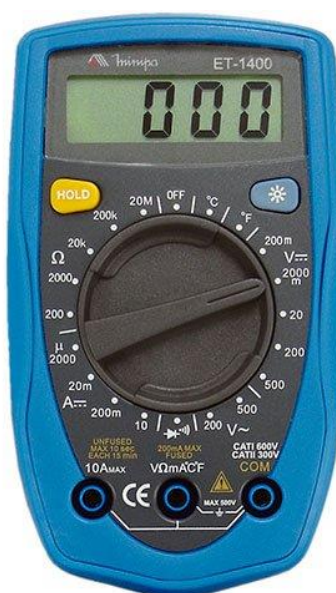
### 3.2.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a experimentação do motor desenvolvido foram feitos dois experimentos. Nestes experimentos foram analisadas as propriedades de temperatura (quente e fria) e rotação. Ambos tiveram a duração de três minutos e trinta segundos, com tomada de dados a cada dez segundos.

Com o objetivo de coletar os dados, foi utilizado um tacômetro a laser direcionado ao volante do modelo “Cat Phaser Laser Tacômetro Digital 1U-7771”, como mostra a Figura 24. Em adição a isso, dois termopares, um encarregado de mensurar a temperatura quente no forno e o outro a temperatura fria no recipiente de água. Os termopares foram conectados a dois multímetros digitais do modelo “Minimapa ET-1400”, conforme a Figura 25.



**Figura 24 : Cat Phaser Laser Tacômetro Digital 1U-7771.**



**Figura 25: Multímetro Digital Minimapa ET-1400.**

Para alimentar o forno utilizou-se estopa e álcool. Os experimentos se diferem pelo combustível utilizado, para o primeiro experimento optou-se pelo álcool etílico 92,8% e para o segundo o álcool em gel 70%. Um intervalo de tempo entre os experimentos foi tomado para que fosse possível estabilizar a temperatura do motor. A temperatura ambiente adotada foi de 30°C.

Espera-se obter uma harmonia entre as propriedades estudadas, assim como a estabilidade das curvas.

#### 4 ANÁLISE DE DADOS

Este tópico é dividido em dois experimentos. Como dito no procedimento experimental, em cada um utiliza-se um combustível diferente, objetivando uma fonte de calor estável. A partir dos dados tomados, são dadas variáveis estatísticas e as curvas são estudadas.

Para analisar as curvas, foram feitos ajustes polinomiais, trata-se de uma linha usada quando os dados flutuam. Pode ser usada, por exemplo, para analisar ganhos e perdas em um conjunto de dados grande. A ordem da polinomial pode ser determinada pelo número de flutuações nos dados ou por quantas dobras (picos e vales) aparecem na curva.

A curva do ajuste representa o resultado esperado, enquanto os pontos mostram o resultado obtido.

##### 4.1 EXPERIMENTO Nº 1

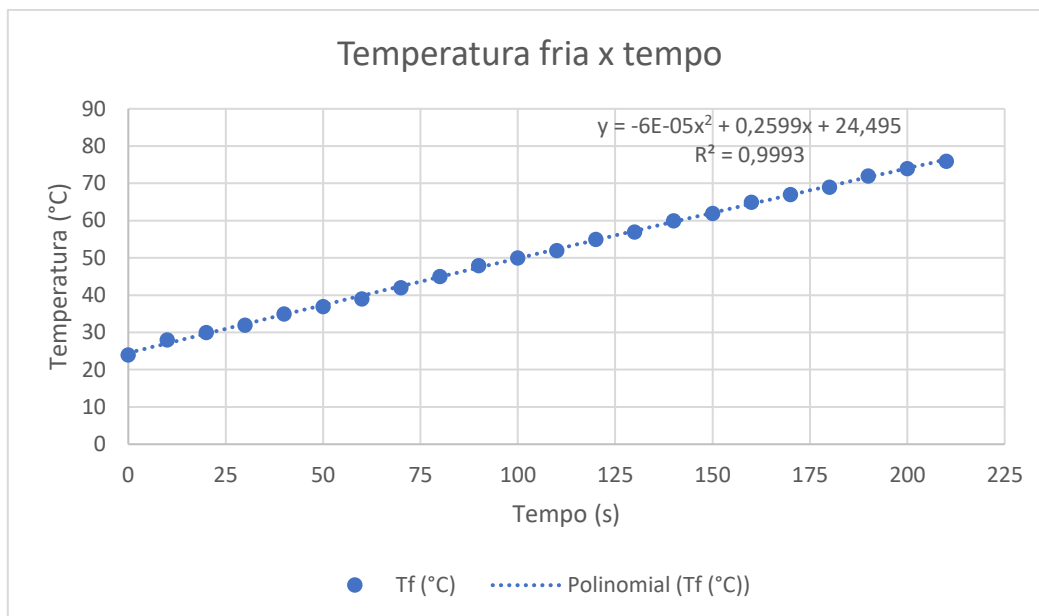
Primeiramente, foi avaliada a temperatura fria. A Tabela 1 mostra variáveis estatísticas do experimento.

**Tabela 1 : Análise estatística da temperatura fria.**

Média Tf (°C)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Dispersão ( $\Delta$ )	Variância ( $s^2$ )
51	16,048	3,178	257,552

Fonte: o autor (2018).

A partir dos dados obtidos foi possível plotar um gráfico, o qual é descrito pela Figura 26.



**Figura 26: Temperatura fria versus tempo.**

Fonte: o autor (2018).

Percebe-se que a curva possui um comportamento crescente, pois devido ao sentido do fluxo de calor, parte do calor que é trocado no sistema é também perdido, tal calor é transferido do forno para o recipiente de água, fazendo com que a temperatura da água tenda a aumentar.

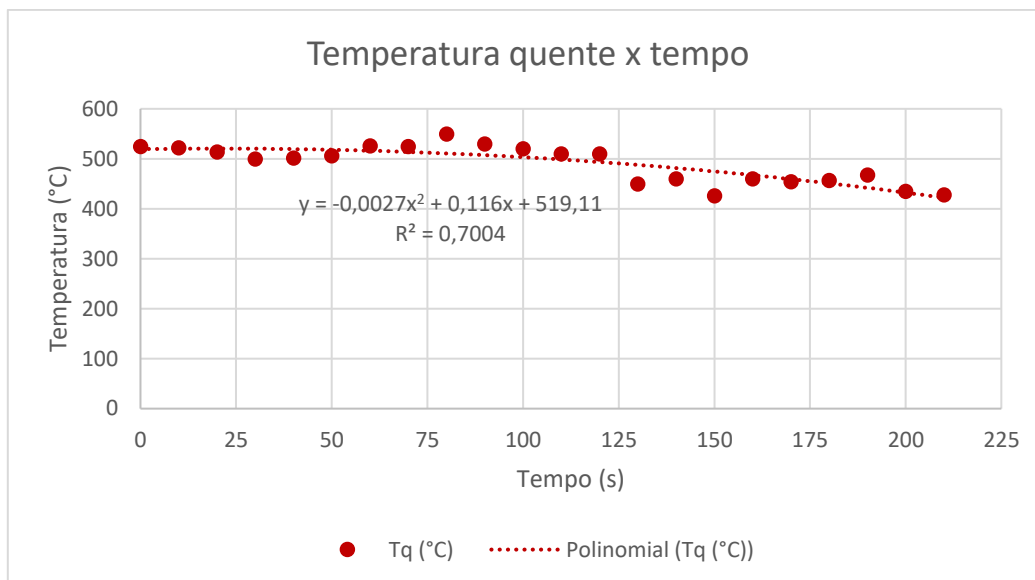
Em seguida, foi analisada a temperatura quente ao longo do tempo, a Tabela 2 confere os dados estatísticos do experimento.

**Tabela 2 : Análise estatística da temperatura quente.**

Média Tq (°C)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Dispersão ( $\Delta$ )	Variância ( $s^2$ )
504	37,784	13,339	1427,610

Fonte: o autor (2018).

O comportamento da curva da temperatura quente pode ser analisado conforme a Figura 27.



**Figura 27: Análise da temperatura quente em função do tempo.**

Fonte: o autor (2018).

Percebe-se que a curva possui “picos e depressões” que refletem em um comportamento instável. Esta instabilidade dentro do forno explica a variação dos dados obtidos.

Em relação à rotação do motor, a Tabela 3 descreve os dados estatísticos.

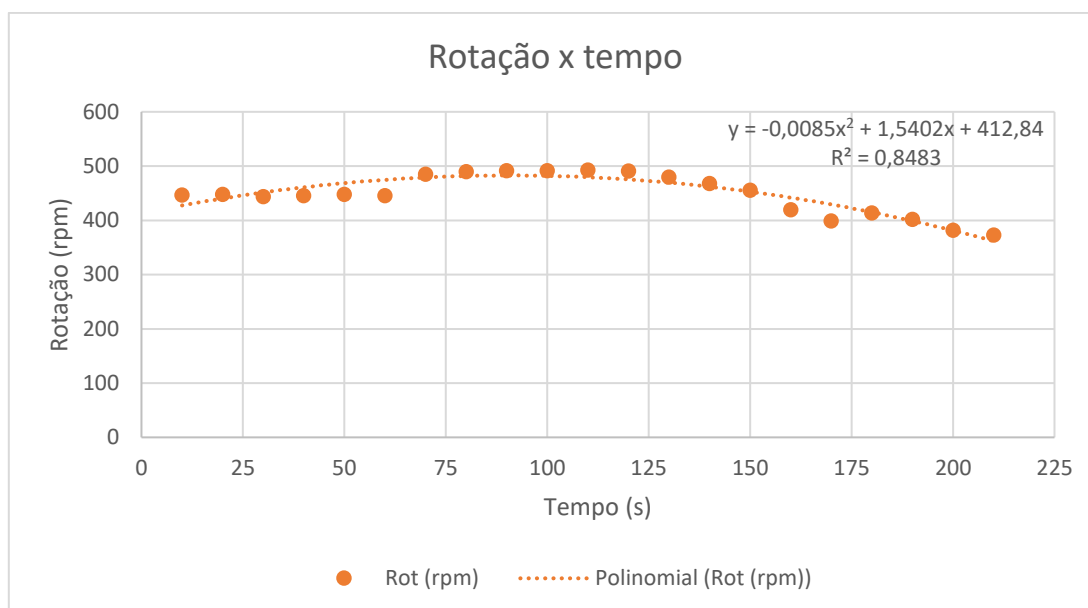
**Tabela 3: Análise estatística da rotação.**

Média Rot (rpm)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Dispersão ( $\Delta$ )	Variância ( $s^2$ )
447,500	37,965	11,787	1441,348

Fonte: o autor (2018).

A Figura 28 mostra como atuou a rotação no experimento.





**Figura 28: Rotação em função do tempo.**

Fonte: o autor (2018).

Tal comportamento já era esperado, como mostrado na temperatura quente, a rotação também possui um alto valor inicial, isto é, devido a energia inicial que é necessária para dar a partida no motor. Posteriormente observa-se a rotação no seu pico, em um regime estável, e por fim a rotação decresce por conta da redução da quantidade de calor no sistema.

#### 4.2 EXPERIMENTO Nº 2

Com o intuito de identificar o efeito da instabilidade da temperatura quente no experimento anterior adotou-se outro combustível, mais estável, o álcool em gel.

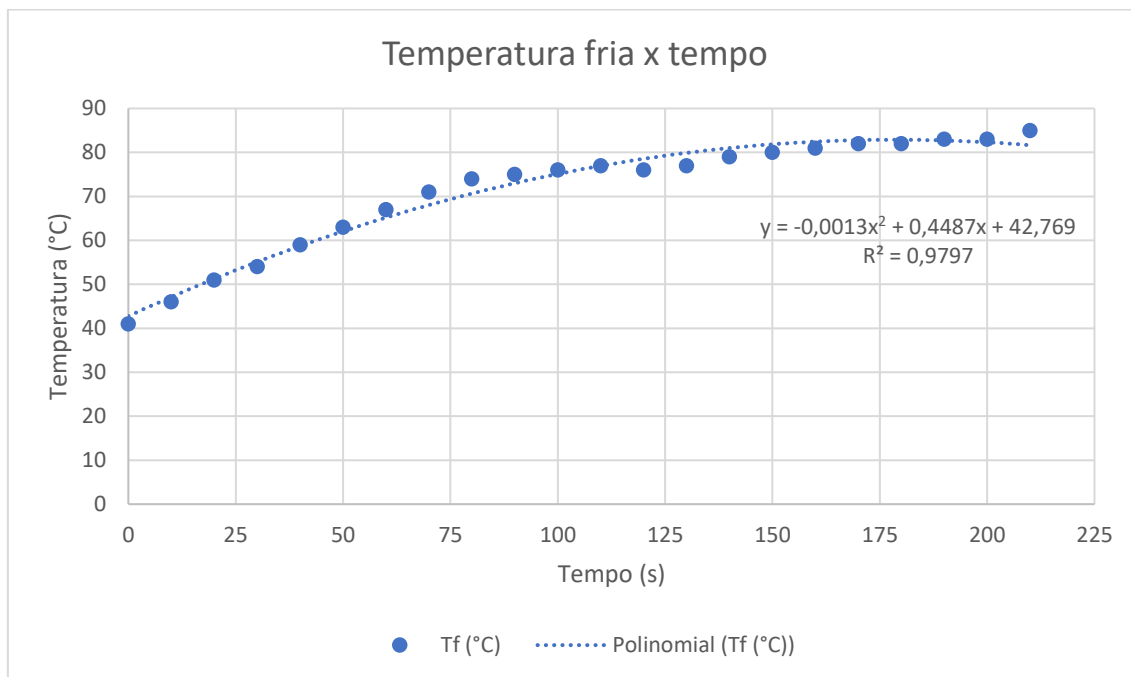
Assim como o experimento anterior, primeiramente foi analisada a temperatura fria. Os dados estatísticos são mostrados pela Tabela 4.

**Tabela 4: Análise estatística da temperatura fria.**

Média Tf (°C)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Dispersão ( $\Delta$ )	Variância ( $s^2$ )
76	13,013	5,840	169,333

Fonte: o autor (2018).

A Figura 29 descreve o comportamento da temperatura fria ao longo do tempo.



**Figura 29: Análise da temperatura fria em função do tempo.**

Fonte: o autor (2018).

Fazendo um comparativo com o experimento anterior, conclui-se que a curva da temperatura fria mostrada na Figura 27, tem uma menor inclinação, tendendo a estabilizar-se. Seu desvio padrão é consideravelmente menor quando comparado.

No entanto, nota-se que a temperatura fria inicial neste experimento é maior quando comparada ao experimento anterior. Tal diferença justifica-se pela troca de combustível, pois o álcool em forma líquida é altamente explosivo enquanto o álcool em gel, devido a sua composição, inibe as características de explosividade do álcool (FONTANA, 2008).

Portanto, até que a energia necessária para iniciar o motor fosse acumulada no forno, o calor era transferido para o recipiente de água. Consequentemente, tem-se a alta média de temperatura.

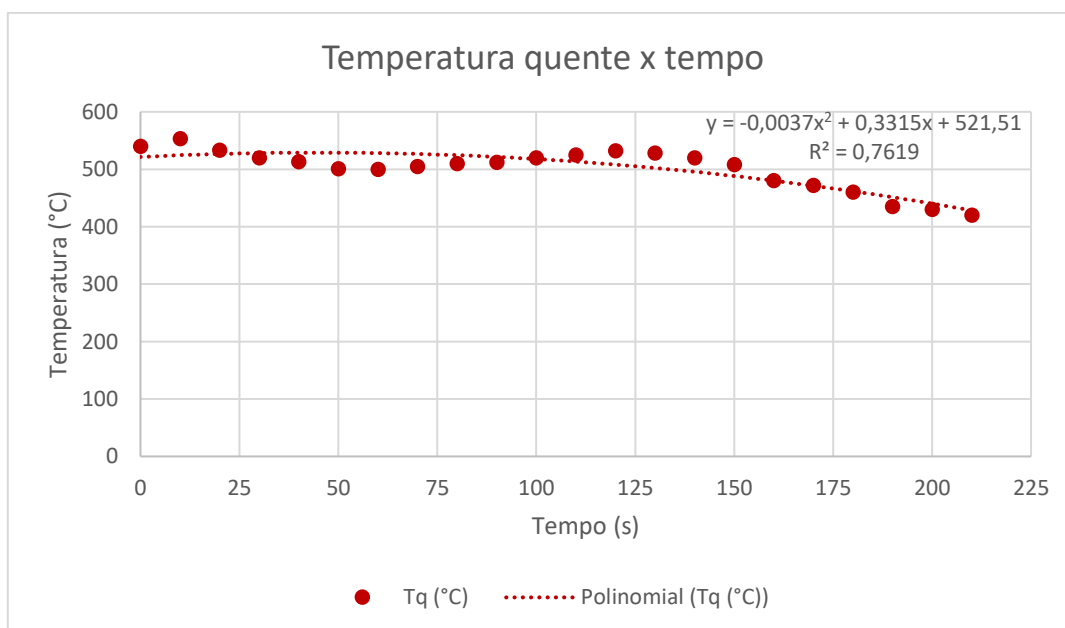
Seguindo o mesmo procedimento, a Tabela 5 contém os dados estatísticos da temperatura quente.

**Tabela 5: Dados estatísticos da temperatura quente.**

Média Tq (°C)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Dispersão ( $\Delta$ )	Variância ( $s^2$ )
511	36,469	14,012	1329,994

Fonte: o autor (2018).

A Figura 30 descreve como os dados se comportam graficamente.

**Figura 30: Temperatura quente versus tempo.**

Fonte: o autor (2018).

Quando comparado com o experimento anterior, obtém-se uma curva mais estável, com “picos e depressões” mais suaves, conferindo um resultado consistente, porém ainda não ideal. Portanto é um gráfico mais contínuo e confiável.

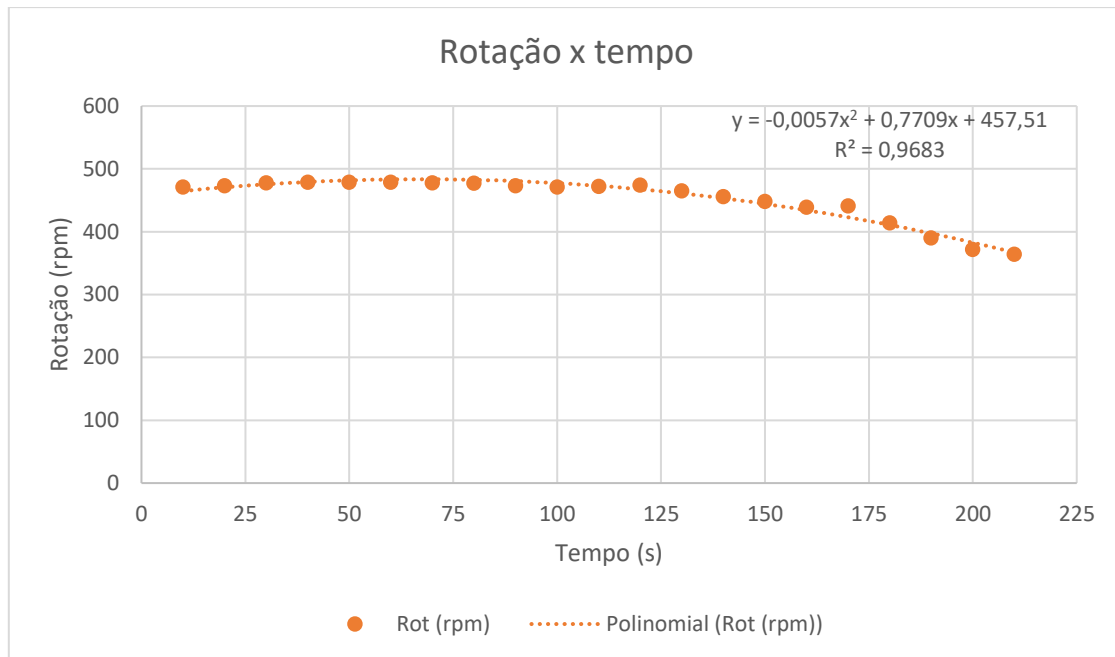
Por fim, a Tabela 6 mostra os dados experimentais estatísticos da rotação.

**Tabela 6: Análise estatística da rotação.**

Média Rot (rpm)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Dispersão ( $\Delta$ )	Variância ( $s^2$ )
471	36,452	12,921	1328,748

Fonte: o autor (2018).

A Figura 31 mostra a análise da rotação em relação ao tempo.

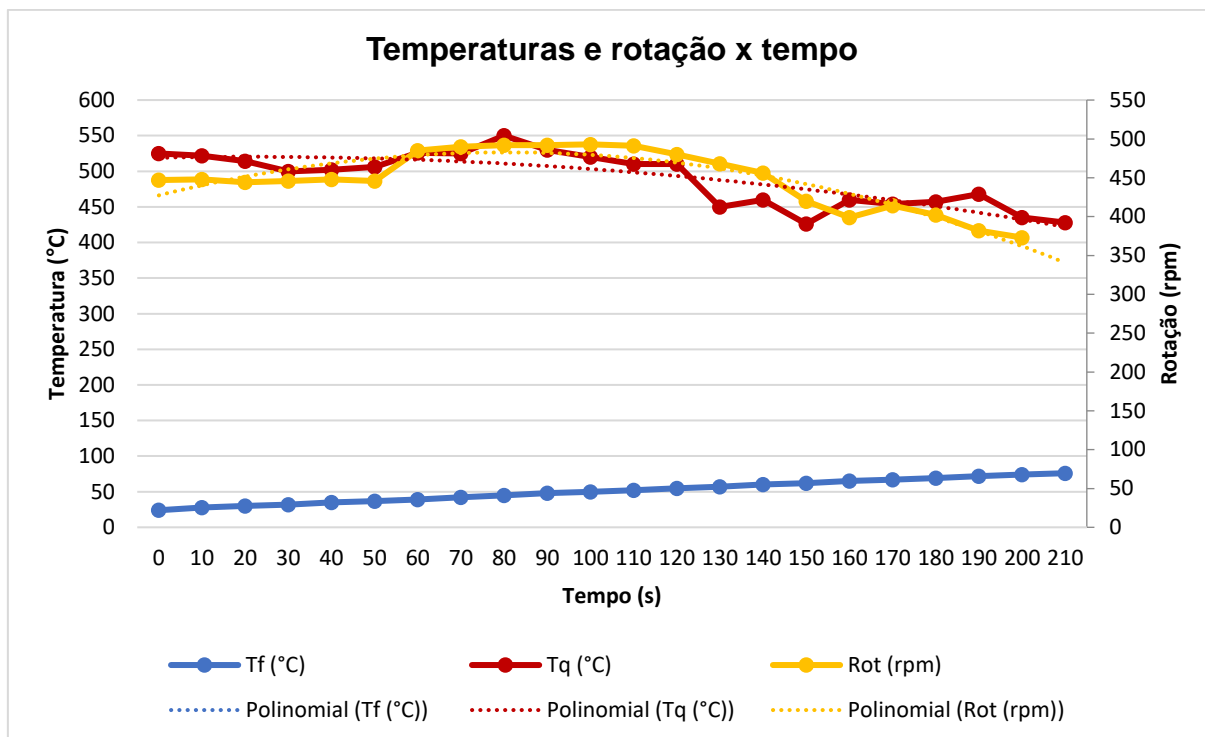


**Figura 31: Rotação em função do tempo.**

Fonte: o autor (2018).

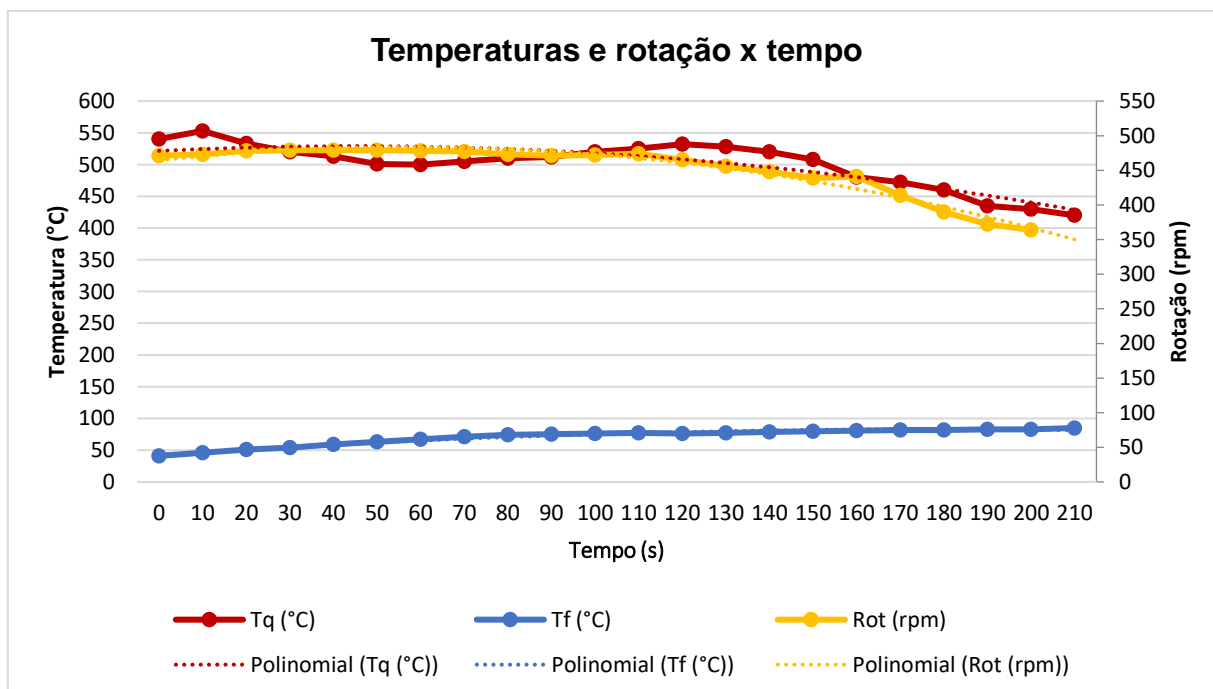
Com um desvio padrão menor que o experimento anterior, o resultado final da rotação obtida não se difere tanto quando comparado ao experimento anterior, conferindo um resultado que era esperado.

Assim, as Figuras 32 e 33 mostram as três curvas de cada experimento no mesmo gráfico, representando o experimento nº 1 e nº 2, respectivamente.



**Figura 32: Estudo comparativo entre as propriedades analisadas no primeiro experimento.**

Fonte: o autor (2018).



**Figura 33: Estudo comparativo entre as propriedades analisadas no segundo experimento.**

Fonte: o autor (2018).

### 4.3 ESTUDO DO RENDIMENTO

Finalmente, estudadas as propriedades da temperatura, a partir da equação 1, compara-se o rendimento do motor desenvolvido ao rendimento de uma máquina de Carnot teórica.

De acordo com a Tabelas 2 e 4, tem-se as médias das temperaturas quente e fria dos experimentos convertidas em Kelvin. Portanto, para o primeiro experimento, tem-se:

$$n_{11} = 1 - \frac{324}{777} = 0,583 = 58,30\% \quad (1.1)$$

Onde, na eficiência, o prefixo subscrito representa o experimento e o sufixo subscrito o combustível utilizado.

Considerando uma máquina de Carnot com um regenerador ideal, pode-se dizer que  $T_f = T_{amb} = 30^\circ C$ , onde a temperatura fria é equivalente a temperatura ambiente, implicando que o sistema conserva a energia e inibe a perda de calor. Assim obtêm-se:

$$n_{12} = 1 - \frac{303}{777} = 0,610 = 61,00\% \quad (1.2)$$

Segundo as Tabelas 8 e 10, seguindo o mesmo raciocínio para o segundo experimento, tem-se:

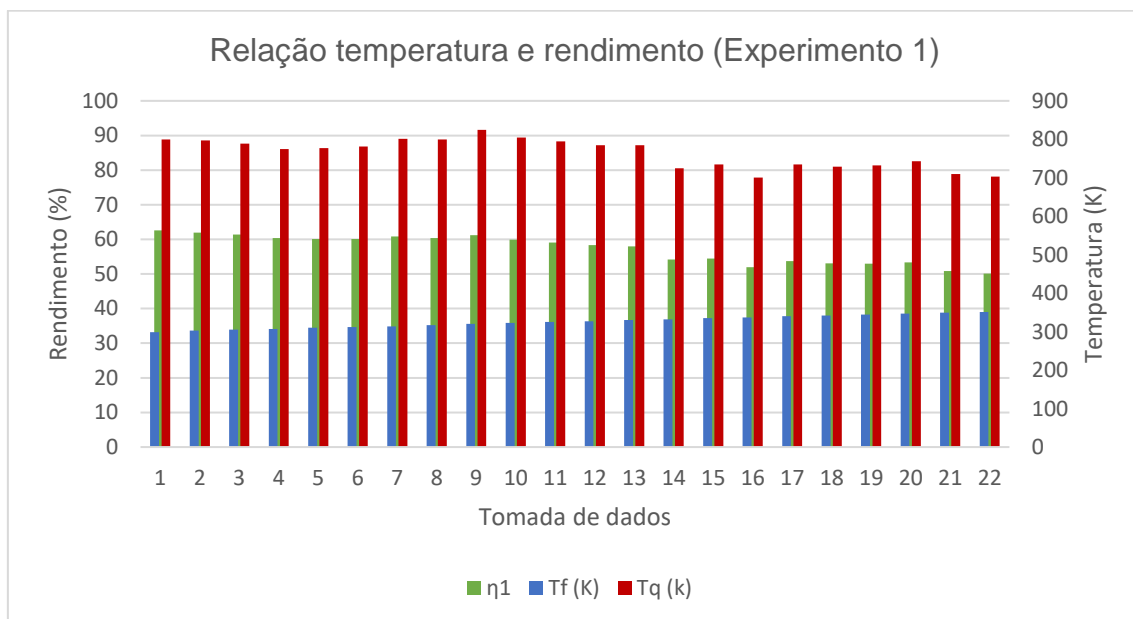
$$n_{21} = 1 - \frac{349}{784} = 0,554 = 55,48\% \quad (1.3)$$

Considerando  $T_f = 30^\circ C$  para uma máquina de Carnot:

$$n_{22} = 1 - \frac{303}{784} = 0,613 = 61,35\% \quad (1.4)$$

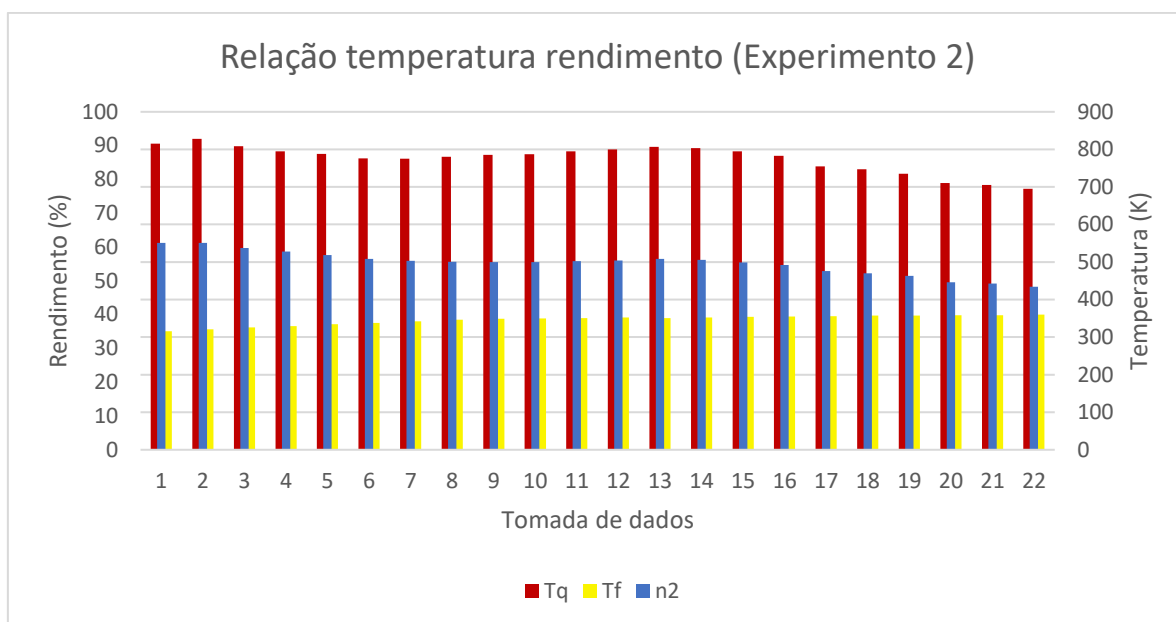
Verifica-se que o rendimento da máquina de Carnot em ambos experimentos é maior do que o rendimento do motor desenvolvido, o que já era esperado. Porém, o rendimento do primeiro experimento mostra-se maior que o do segundo, ou seja  $n_{11} > n_{21}$ , devido ao alto valor médio da temperatura fria adquirida no experimento, consequência da partida do motor que foi retardada.

Por fim as Figuras 34 e 35 destacam os rendimentos em temperaturas pontuais referentes aos experimentos realizados.



**Figura 34: Rendimentos pontuais do experimento 1.**

Fonte: o autor (2018).



**Figura 35: Rendimentos pontuais do experimento 2.**

Fonte: o autor (2018).

## 5 CONCLUSÃO

A ideia em projetar e construir algo como trabalho de conclusão de curso foi opcional. O trabalho une o embasamento teórico do ciclo Stirling com o comportamento prático do motor de configuração Gama, englobando diferentes eixos do curso de engenharia mecânica, como por exemplo: elementos de máquinas, física I e II, máquinas térmicas, termodinâmica e transferência de calor, tornando-o um projeto abrangente.

Verificou-se que o motor respeita as leis termodinâmicas, ciclo teórico Stirling e como ele se aproxima de uma máquina de Carnot em termos de eficiência.

Durante a montagem do motor encontrou-se algumas dificuldades técnicas, proporcionando experiências no laboratório e consequentemente o aprendizado ao manusear o maquinário que ele contém. O motor é composto de materiais de fácil acesso e até mesmo descartáveis. Sabe-se que por isto, ele possui perdas de carga, uma pequena vida útil e seu material pode não ser o mais adequado para a aplicação do trabalho.



A rotação obtida no experimento tem um comportamento confiável e é fiel as curvas de temperatura estudadas. De fato, é a instabilidade do calor no forno, que representa a temperatura quente, a principal problemática do projeto, tal instabilidade implica diretamente nas outras propriedades analisadas, comprometendo a confiabilidade do experimento.

A mudança de combustível entre os experimentos tem o intuito de buscar a estabilidade dos dados. A fonte de calor produzida pelo álcool etílico apresenta um comportamento aleatório, justificando a curva da temperatura quente no primeiro experimento. Em contrapartida, o álcool em gel resulta numa curva mais suave, porém a mudança para tal combustível retardou a partida do motor, fazendo com que o calor gerado no forno fosse transferido ao recipiente de água, alterando a temperatura fria e conseqüentemente influenciando o rendimento obtido.

As eficiências térmicas obtidas no trabalho encontram-se dentro do esperado, ou seja, em ambos experimentos a eficiência de Carnot apresenta-se maior que as demais, comprovando assim um de seus fundamentos teóricos. Porém seus altos valores não condizem com a teoria, tornando-se possível algum erro na metodologia dos cálculos. Além disso, conclui-se que a eficiência do primeiro experimento é maior do que a do segundo devido a partida do motor que foi retardada, conseqüência direta da troca de combustível do motor.

Por fim, a construção do motor e seu funcionamento foram satisfatórios. Algumas mudanças como o material que compõe o motor e a fonte de calor podem ser modificadas com a finalidade de obter melhores resultados experimentais. Os materiais selecionados não foram adequados para a construção e desenvolvimento do projeto, potencializando a convecção e condução do sistema e conseqüentemente aumentando a perda de calor. Ainda assim, foi possível estimar o rendimento do motor, comparando-o a um modelo teórico de Carnot.

Futuros projetos podem ser feitos dando continuidade a este trabalho, pode-se estudar possíveis cogerações, desenvolver e analisar ciclos combinados e implementar um regenerador com o objetivo de aprimorar o rendimento.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(SES), S. N. L. A. S. E. S. **Stirling Energy Systems set new record for solar to grid conversion efficiency**. Albuquerque, 2008.

AGENCY, I. E. **Key World Energy Statistics**. Paris, 2010.

BARROS, R. W. **Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis**. Itajubá: UNIFEI, 2005.

CARRIL, T.; FRANCO, E. **Motores Stirling**. São Paulo: Unicamp, 2016.

CRESTANI, M. **Projeto e construção de um motor Stirling do tipo Gama com elementos mecânicos mutáveis**. Pato Branco, 2016.

CRUZ, V. D. **Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo Gama**. João Pessoa, 2012.

DARLINGTON, R.; STRONG, K. **Stirling and hot air engines**. Crowood Press, 2005.

DENTELLO, R. **Estudo de geração de energia elétrica em motores Stirling acionados por biogás e/ou energia solar**. Guaratinguetá, 2017.

ENGINEER", T. F.". **Air Engines**, 2001.

FONTANA, E. **Determinação do calor de combustão do álcool etílico**. Jequié, 2008.

HIRATA, K. **Stirling Engines**, 2013. Disponível em: <<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/>>.

MARTINI, W. **Stirling engine design-manual**. Honolulu: University Press of the Pacific, 1983.

MELLO, M. G. **Biomassa energia dos trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: LadMídia/FAFICH, 2001.

MOTOR, D. Aplicações do motor Stirling, 28 Maio 2018. Disponível em: <<https://pt.demotor.net/motor-stirling/aplicativos>>.

NASA. **Development of a low inductance linear alternator for Stirling power convertors**. Glen Research Center, Cleveland: [s.n.], 2017.

NUAYED, E. **Termodinâmica**. Belém, 2013.

PAUTZ, E. **Estudo e projeto de um motor Stirling**. Pinambi: [s.n.], 2013.

SANTOS, E. **Estudo da utilização do motor Stirling na geração de energia heliotérmica**. Salvador, 2014.

SONNTAG, R. E. . B. C. . W. G. J. V. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Blucher, 2009.

SOUZA, C. C. D. Agrolink, 2017. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/colunistas/coluna/vem-ai-a-revolucao-dos-novos-motores-stirling-modificados---gracas-a-poderosa-protecao-do-setor-aerospacial-submarino\\_397977.html](https://www.agrolink.com.br/colunistas/coluna/vem-ai-a-revolucao-dos-novos-motores-stirling-modificados---gracas-a-poderosa-protecao-do-setor-aerospacial-submarino_397977.html)>. Acesso em: 06 Junho 2018.

SOUZA, C. D. **Estudo da transferência de calor da câmara fria de um motor Stirling tipo Gama**. Pato Branco, 2017.

TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

WAGNER, L. **Manual do motor Stirling**, 2015. Disponível em: <<http://manualdomotorstirling.blogspot.com/>>. Acesso em: 07 Setembro 2017.

WALKER, G. **Stirling Engines**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1980.

## **ANEXOS**

NOTA: para preservar a resolução dos desenhos técnicos, eles serão impressos e enviados separadamente em uma pasta compactada via e-mail.

**ANEXO 1 – DESENHO TÉCNICO DO PISTÃO DESLOCADOR**

**ANEXO 2 – DESENHO TÉCNICO DO CILINDRO DE EXPANSÃO**

**ANEXO 3 – DESENHO TÉCNICO DO RECIPIENTE D'ÁGUA**

**ANEXO 4 – DESENHO TÉCNICO DO CILINDRO DE COMPRESSÃO**

**ANEXO 5 – DESENHO TÉCNICO DO CONJUNTO CONFIGURAÇÃO  
GAMA**