

**INSTITUTO  
FEDERAL**

Bahia

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA  
BAHIA**

**VICTOR BASTOS GONÇALVES MOURA**

**ESTUDO DE MOTORES STIRLING SOLARES PARA  
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

**JEQUIÉ-BA**

**2023**

**VICTOR BASTOS GONÇALVES MOURA**

**ESTUDO DE MOTORES STIRLING SOLARES PARA  
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação de Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia campus Jequié como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Andrade Rocha

JEQUIÉ-BA  
2023

**VICTOR BASTOS GONÇALVES MOURA**

**ESTUDO DE MOTORES STIRLING SOLARES PARA  
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

A banca examinadora, abaixo listada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “ESTUDO DE MOTORES STIRLING SOLARES PARA SISTEMAS DE BOMBEAMENTO” elaborado por “VICTOR BASTOS GONÇALVES MOURA” como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

JEQUIÉ-BA, 15/12/2022

Comissão Examinadora

---

**Prof. Dr. Marcio Andrade Rocha**  
IFBA  
(Orientador)

---

**Prof. Esp. Vitor Silva Vieira**  
IFBA

---

**Prof. Dr. Thiago Luis Costa Cavalcanti**  
Novaes  
IFPE

# AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho e toda emoção da conclusão do curso à meus pais Regina Vitória Bastos e Juscelino Gonçalves Moura, meu irmão Thomaz Bastos e minha esposa (e coorientadora) Layse Inocência, por todo apoio e motivação. E em memória ao meu padrinho José Saraiva, este trabalho é para e por vocês.

Acima de tudo agradeço a Deus, e também têm minha gratidão todas as pessoas que estiveram comigo nesta caminhada, de 2019 até 2023. Familiares, colegas, professores e todos os funcionários do IFBA campus Jequié, que participaram direta ou indiretamente desta jornada. Muito grato a todos amigos conquistados nesta jornada, um salve especial para Lucas Meira, Natiale Almeida. Gratidão aos professores da disciplina TCC, Rita e Fabiano pelos ensinamentos. E ao orientador Márcio Rocha, por sempre me indicar o caminho certo.

## RESUMO

A pesquisa em máquinas térmicas tem direcionado esforços para melhorar a eficiência, reduzir os impactos ambientais e diversificar as matrizes energéticas. Dentre as alternativas, os motores Stirling, que operam com combustão externa, apresentam eficiência térmica teórica superior aos motores de combustão interna, oferecendo flexibilidade no uso de diversas fontes de calor, incluindo energia solar térmica. Trata-se de um trabalho teórico e experimental, cujo os dados são utilizados de forma comparativa a partir de simulações e algoritmos obtidos pelas análise adiabática, da teoria de Schmidt em relação aos ensaios experimentais. Avalia-se diferentes condições de operação de um motor Stirling, utilizando por matrizes energéticas álcool 70% e energia heliotérmica com e sem resfriamento, para análise do rendimento térmico e geração de energia elétrica. A metodologia foi desenvolvida a partir de alguns passos: montagem do sistema Stirling acionado a álcool assim como o heliotérmico, composto por um coletor solar tipo lente fresnel; realização de testes a vazio sob diferentes configurações para coleta de dados experimentais, como temperaturas de arrefecimento e aquecimento, bem como as grandezas elétricas de tensão e corrente geradas. Por fim, a análise e comparação dos resultados teóricos e experimentais apontou que a simulação baseada na análise Schmidt se aproxima dos resultados obtidos pelos testes práticos. Constatou-se que incrementar o fornecimento de calor, assim como otimizar o arrefecimento impacta positivamente no rendimento térmico. Destaca-se o ganho de rendimento térmico obtido através do resfriamento da câmara de compressão como calço teórico para sugerir a tecnologia solar Stirling como uma alternativa viável para a geração de energia em sistemas de bombeamento de água, especialmente quando a água bombeada é utilizada como fonte fria, contribuindo para a melhoria do rendimento do sistema.

**Palavras-chave:** Coletor solar, Energia solar, Máquinas térmicas, sistemas de bombeamento, Geração de energia, Motor Stirling.

## STUDY OF SOLAR STIRLING ENGINES FOR PUMPING SYSTEMS

### ABSTRACT

The research in thermal machines has directed efforts towards improving efficiency, reducing environmental impacts, and diversifying energy matrices. Among the alternatives, Stirling engines, which operate with external combustion, exhibit theoretically higher thermal efficiency than internal combustion engines, offering flexibility in using various heat sources, including solar thermal energy. This is a theoretical and experimental work, where data is comparatively analyzed using simulations and algorithms obtained through adiabatic analysis, based on Schmidt's theory in relation to experimental tests. Different operating conditions of a Stirling engine are evaluated using energy matrices of 70% alcohol and heliothermal energy with and without cooling, to analyze thermal efficiency and electricity generation. The methodology was developed through several steps: assembling the Stirling system powered by alcohol and heliothermal energy, consisting of a Fresnel lens-type solar collector; conducting idle tests under different configurations to collect experimental data, such as cooling and heating temperatures, as well as electrical quantities of generated voltage and current. Finally, the analysis and comparison of theoretical and experimental results indicated that the simulation based on Schmidt's analysis closely approximates the results obtained from practical tests. It was found that increasing heat supply and optimizing cooling positively impact thermal efficiency. The gain in thermal efficiency obtained through compression chamber cooling stands out as a theoretical support for suggesting Stirling solar technology as a viable alternative for power generation in water pumping systems, especially when the pumped water is used as a cold source, contributing to the system's overall efficiency improvement.

**Keywords:** Solar collector, Solar energy, Thermal machines, Pumping systems, Power generation, Stirling engine.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade Global de Energia Solar Térmica Concentrada, por País e Região, 2012-2022. . . . .	7
Figura 2 – Geração Heliotérmica por torre central. . . . .	8
Figura 3 – Geração Heliotérmica por sistema de calha. . . . .	9
Figura 4 – Geração Heliotérmica por concentradores do tipo lineares fresnel. . . . .	10
Figura 5 – Geração Heliotérmica por concentradores Parabólicos. . . . .	11
Figura 6 – Concentrador de lente fresnel. . . . .	12
Figura 7 – Diagramas de propriedades para o Ciclo de Carnot. . . . .	13
Figura 8 – Ciclo Stirling. . . . .	15
Figura 9 – Esquema de um motor Stirling tipo alfa. . . . .	18
Figura 10 – Deslocamento senoidal dos pistões do motor Stirling. . . . .	20
Figura 11 – Classificação dos Motores Stirling. . . . .	22
Figura 12 – Classificação dos Motores Stirling Cinemáticos. . . . .	23
Figura 13 – Setor Agropecuário. . . . .	25
Figura 14 – Estrutura do Consumo no Setor Agropecuário. . . . .	26
Figura 15 – Consumo de energia nos sistemas de abastecimento de água. . . . .	27
Figura 16 – Média da irradiação solar no plano horizontal no ano 2022 em Jequié-BA. . . . .	29
Figura 17 – Temperaturas no ano 2022. . . . .	29
Figura 18 – Motor Stirling educacional tipo alfa. . . . .	30
Figura 19 – Concentrador solar tipo lente fresnel. . . . .	31
Figura 20 – Configuração da montagem para coleta de dados. . . . .	32
Figura 21 – Ensaio com combustível alcool 70%. . . . .	33
Figura 22 – Ensaio com concentrador solar lente fresnel. . . . .	33
Figura 23 – Temperatura foco Solar. . . . .	37
Figura 24 – Diagrama P-V. . . . .	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis de estado ciclo <i>Stirling</i> . . . . .	17
Tabela 2 – Média da irradiação solar no plano horizontal no ano 2022 em Jequié-BA. . .	28
Tabela 3 – Análise adiabática ideal. . . . .	34
Tabela 4 – Dados para combustível álcool 70%. . . . .	38
Tabela 5 – Resultados estatísticos obtidos a partir dos dados da Tabela 4. . . . .	38
Tabela 6 – Dados para concentrador lente fresnel. . . . .	39
Tabela 7 – Resultados estatísticos obtidos a partir dos dados da Tabela 6. . . . .	39
Tabela 8 – Dados para concentrador lente fresnel. . . . .	40
Tabela 9 – Dados para concentrador lente fresnel. . . . .	40
Tabela 10 – Dimensões do Motor. . . . .	41
Tabela 11 – Volumes de Controle. . . . .	41
Tabela 12 – Resultado das variáveis de estado para análise adiabática ideal. . . . .	41
Tabela 13 – Resultado da Análise Adiabática. . . . .	42
Tabela 14 – Comparação dos resultados. . . . .	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CSP	Energia solar térmica concentrada (Concentrating Solar Power)
DCET	Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IFBA	Instituto Federal da Bahia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço estadunidense (National Aeronautics and Space Administration)
ONU	Organização das Nações Unidas
PRPGI	Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação
SNIS-AE	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - Água e Esgoto

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	ângulo de fase
$A$	Área da seção transversal do pistão
$C_v$	Calor específico a volume constante para gás de trabalho
$\delta U$	Variação de energia interna
$E$	Tensão
$\varepsilon$	Eficiência
$\eta$	Eficiência
$\eta_{carnot}$	Rendimento térmico no ciclo de Carnot
$\eta_m$	Rendimento térmico do motor
$\eta_{stirling}$	Rendimento térmico na máquina <i>Stirling</i>
$\dot{W}$	Potência obtida
$i$	Corrente
$M_{total}$	A massa total de gás no motor
$m$	Massa de um gás ideal contida em um determinado volume de controle
$m_c$	Massa de um gás ideal contida no volume de compressão
$m_e$	Massa de um gás ideal contida no volume de expansão
$m_h$	Massa de um gás ideal contida no volume do aquecedor
$m_l$	Massa de um gás ideal contida no volume do resfriador
$m_r$	Massa de um gás ideal contida no volume do regenerador
$n$	Quantidade de matéria em mols
$N$	Velocidade de rotação
$P$	Pressão do gás
$P_{med}$	Pressão média
$P_1$	Pressão do gás no estágio 1 do ciclo <i>Stirling</i>

$P_2$	Pressão do gás no estágio 2 do ciclo <i>Stirling</i>
$P_3$	Pressão do gás no estágio 3 do ciclo <i>Stirling</i>
$P_4$	Pressão do gás no estágio 4 do ciclo <i>Stirling</i>
$Q$	Calor
$Q_c$	Calor trocado pelo gás no volume de compressão
$Q_e$	Calor trocado pelo gás no volume de expansão
$Q_{in}$	Calor de entrada
$r$	Raio da parte esférica do cilindro
$R$	Constante dos gases ideais
$s$	Deslocamento do pistão
$T$	Temperatura absoluta do gás
$T_1$	Temperatura absoluta do gás no estágio 1 do ciclo <i>Stirling</i>
$T_2$	Temperatura absoluta do gás no estágio 2 do ciclo <i>Stirling</i>
$T_3$	Temperatura absoluta do gás no estágio 3 do ciclo <i>Stirling</i>
$T_4$	Temperatura absoluta do gás no estágio 4 do ciclo <i>Stirling</i>
$T_f$	Temperatura final
$T_h$	Temperatura alta
$T_i$	Temperatura inicial
$T_l$	Temperatura baixa
$\Theta$	Ângulo da manivela
$\eta_{stirling}$	Rendimento térmico na máquina <i>Stirling</i>
$\eta_m$	Rendimento térmico do motor
$\dot{W}$	Potência obtida
$V$	Volume do gás
$V_1$	Volume no estágio 1 do ciclo <i>Stirling</i>
$V_2$	Volume no estágio 2 do ciclo <i>Stirling</i>

$V_3$	Volume no estágio 3 do ciclo <i>Stirling</i>
$V_4$	Volume no estágio 4 do ciclo <i>Stirling</i>
$V_c$	Volume de compressão
$V_{clc}$	Volume morto no espaço de compressão
$V_{cle}$	Volume morto no espaço de expansão
$V_e$	Volume de expansão
$V_{swe}$	Volume varrido pelo curso do pistão no espaço de expansão
$V_f$	Volume final
$V_i$	Volume inicial
$V_l$	Volume do resfriador
$V_r$	Volume do regenerador
$V_{swc}$	Volume varrido pelo curso do pistão no espaço de compressão
$W$	Trabalho realizado
$W_e$	Trabalho realizado pelo gás no volume de expansão
$W_{liq}$	Trabalho líquido

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.2.1 GERAL	1
1.2.2 ESPECÍFICOS	2
<b>2 – REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1 ENERGIA SOLAR	3
2.1.1 O SOL	3
2.1.2 TIPOS DE ENERGIA SOLAR	4
2.1.2.1 ENERGIA SOLAR PASSIVA	5
2.1.2.2 ENERGIA SOLAR ATIVA	5
2.1.2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	5
2.1.2.4 COMBUSTÍVEL SOLAR	5
2.1.2.5 GERAÇÃO HELIOTÉRMICA	6
2.2 MOTOR STIRLING	12
2.2.1 CICLO DE CARNOT	13
2.2.2 RENDIMENTO DO CICLO STIRLING	14
2.2.3 CICLO DE STIRLING	14
2.2.4 ANÁLISES TEÓRICAS	16
2.2.4.1 ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL	16
2.2.4.2 ANÁLISE DE SCHMIDT	18
2.2.5 REGENERADOR	21
2.2.6 TIPOS DE MOTORES STIRLING	22
2.2.6.1 MOTORES STIRLING CINEMÁTICOS	22
2.2.6.2 MOTORES STIRLING DINÂMICOS	23
2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	24
2.3.1 PANORAMA ENERGÉTICO DA AGROPECUÁRIA	25
2.3.2 PANORAMA ENERGÉTICO NOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTO	26
<b>3 – METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
3.1 DADOS CLIMÁTICOS DE JEQUIÉ-BA	28
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.2.1 MOTOR STIRLING	30
3.2.2 COLETOR FRESNEL E FIXADORES	31

3.2.3	MONTAGEM . . . . .	31
3.3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS . . . . .	32
3.4	ANÁLISES TEÓRICAS . . . . .	33
3.4.1	ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL . . . . .	34
3.4.2	ANÁLISE DE SCHMIDT . . . . .	35
3.4.2.1	ALGORITMO PARA ANÁLISE DE SCHMIDT . . . . .	36
<b>4</b>	<b>– RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>37</b>
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS . . . . .	37
4.1.1	ENSAIO COM COMBUSTÍVEL . . . . .	38
4.1.2	ENSAIO HELIOTÉRMICO . . . . .	39
4.1.3	ENSAIO HELIOTÉRMICO RESFRIADO . . . . .	40
4.2	RESULTADOS DAS ANÁLISES TEÓRICAS . . . . .	41
4.2.1	EFICIÊNCIA, TRABALHO E CALOR DE ACORDO A ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL . . . . .	41
4.2.2	ANÁLISE DE SCHMIDT . . . . .	42
4.2.2.1	DIAGRAMA P-V . . . . .	42
4.2.2.2	POTÊNCIA TEÓRICA ESTIMADA . . . . .	43
4.3	DADOS TEÓRICOS X DADOS EXPERIMENTAIS . . . . .	44
4.3.1	PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DE MOTORES STIRLING SOLARES EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO . . . . .	45
<b>5</b>	<b>– CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>Referências . . . . .</b>		<b>48</b>
<b>Anexos</b>		<b>50</b>
<b>ANEXO A – ALGORÍTIMO ANALISE DE SCHMIDT . . . . .</b>		<b>51</b>
<b>ANEXO B – TABELAS ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL . . . . .</b>		<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A pesquisa em máquinas térmicas tem sido uma área de grande relevância, impulsionado pela busca contínua por melhorias na eficiência energética, redução dos impactos ambientais e diversificação das fontes de energia. Dentro desse contexto, os motores Stirling surgem como uma alternativa. Estes motores, caracterizados pelo seu funcionamento de combustão externa, opera em um ciclo termodinâmico que apresenta eficiência térmica teórica superior aos motores de combustão interna como descrevem Çengel e Boles (2013). Além disso, sua versatilidade em operar com diversas fontes de calor, incluindo a energia solar térmica, os torna particularmente atrativos para aplicações sustentáveis.

Este trabalho propõe a análise teórica e experimental de um motor Stirling utilizando por fontes energéticas a combustão de álcool 70% e heliotérmica a partir de concentrador do tipo lente Fresnel. O objetivo principal dessa pesquisa é avaliar o desempenho desse sistema no que diz respeito ao rendimento térmico e à geração de energia visando respaldar em dados uma alternativa de acionamento de bombas através da tecnologia solar Stirling propondo uma variação nas matrizes energéticas atuais.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Levar a lugares de difícil acesso a rede de transmissão de energia, uma alternativa de fonte de energia para acionamento de sistemas de bombeamento, atenuando a dependência de combustíveis fósseis nestes contextos. Aliado a isso, buscar por alternativas sustentáveis na matriz energética, principalmente diante das demandas ambientais e por melhorias de eficiência energética em sistemas de bombeamento, a partir disso propor uma alternativa baseada em energia solar térmica para o acionamento de bombas.

As principais motivações deste projeto são a associação entre a redução de custos e a utilização de fontes sustentáveis, afim de propor a partir da análise de dados experimentais um sistema de bombeamento utilizando motor Stirling solar.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 GERAL

Esse trabalho tem como objetivo principal avaliar um motor Stirling solar em diferentes condições de operação, quanto ao seu rendimento térmico e geração energética, para respaldar uma proposta de um sistema de bombeamento com motor Stirling solar.

### 1.2.2 ESPECÍFICOS

- (i) Avaliar teoricamente, o desempenho de um motor Stirling e do sistema Stirling solar.
- (ii) Avaliar experimentalmente, o desempenho de um motor Stirling acionado por álcool 70%.
- (iii) Avaliar experimentalmente, o desempenho do sistema Stirling solar, com e sem resfriamento a água.
- (iv) Respalda em dados uma proposta de sistema de bombeamento de água, implementando a tecnologia Stirling solar utilizando a água bombeada como arrefecimento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR

O desenvolvimento e a implementação de fontes de energia sustentáveis e renováveis têm sido um dos focos primordiais no cenário energético global. A energia solar se consolida como uma das principais alternativas. Esta fonte, contínua e inesgotável diante a perspectiva temporal da história da humanidade, é vital tanto para o aquecimento quanto para a iluminação do planeta terra, tornando-se essencial para o desenvolvimento da humanidade. A ampliação do uso dessa fonte de energia representa não apenas uma resposta às crescentes demandas energéticas, mas também uma estratégia vital para a mitigação das mudanças climáticas. Muitos dos processos usuais de transformação de energia, desde hidroelétricas até os aerogeradores eólicos, são derivadas, mesmo que de forma indireta, do Sol.

A evaporação da água pela energia solar é a base do ciclo hidrológico, que fornece água para uso doméstico e industrial. A energia solar também influencia a formação dos ventos, que se formam a partir da conversão da radiação solar em energia cinética, em função de um balanço diferenciado nas diferentes latitudes entre a radiação solar incidente e a radiação terrestre emitida. Substâncias como petróleo, carvão e gás natural são fontes de energia fóssil, ou seja, foram formadas a partir de restos orgânicos de plantas e animais que viveram há milhões de anos. Esses restos orgânicos tiveram durante suas existências fontes de energia oriundas direta ou indiretamente da fotossíntese. A energia solar é essencial para a fotossíntese. Essa energia é armazenada nas plantas na forma de açúcares, que podem ser usados como alimento ou para a produção de combustível (PINHO; GALDINO, 2014).

#### 2.1.1 O SOL

O Sol emite radiação semelhante a um corpo negro a uma temperatura de 5800 K. À medida que essa radiação percorre o espaço, o fluxo radiante diminui, pois se espalha por áreas esféricas crescentes. A constante solar,  $S_c$ , "é definida como o fluxo de energia solar que incide sobre uma superfície com orientação normal aos raios solares no limite externo da atmosfera terrestre, quando a Terra encontra-se à sua distância média do Sol. Ela tem um valor de  $1368 \pm 0.65 \text{ W/m}^2$ ." Incropera et al. (2019).

O astro central do sistema solar, exerce uma influência gravitacional predominante sobre os demais corpos celestes que o orbitam. Estima-se que sua formação tenha ocorrido há aproximadamente 4,6 bilhões de anos, detendo mais de 99% da massa total do sistema solar, é composto majoritariamente por hidrogênio, constituindo cerca de 90% dos seus átomos, seguido pelo hélio, que compreende aproximadamente 9,9% e os demais 0,1% são constituídos

por elementos mais densos, incluindo oxigênio, carbono e ferro. De acordo Lang e Zirin (2019), a emissão energética do sol deriva principalmente da transformação de átomos de hidrogênio em átomos de hélio no núcleo solar, um processo conhecido como fusão nuclear, que transformam cerca de 4,5 milhões de toneladas de matéria em energia a cada segundo, gerando neutrinos e radiação solar. Uma quantidade mínima dessa energia que atinge a atmosfera terrestre fornece a luz e o calor necessários para sustentar a vida no planeta. Sendo uma esfera gasosa luminosa com um diâmetro de 1.392.000 *Km*, sua massa é aproximadamente 330.000 vezes superior à da Terra. A temperatura em seu núcleo aproxima-se de 15.000.000 °C enquanto na superfície, a temperatura é em torno de 6.000 °C, segundo dados oficiais da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço estadunidense (NASA) (HATHAWAY, 2022).

O núcleo solar é composto predominantemente por plasma, uma forma de gás ionizado, resultante da remoção de elétrons dos átomos sob condições de pressão altíssimas. Esta pressão no núcleo do sol permite que os núcleos de hidrogênio superem suas forças repulsivas eletrostáticas, desencadeando um processo de fusão nuclear. Durante essa fusão, um isótopo de hidrogênio ( $^1\text{H}$ ), que contém um único próton, pode se aproximar de outro próton, ocasionando o fenômeno conhecido como decaimento beta, um próton é convertido em um nêutron e se combina ao outro próton, o produto deste evento é formação de um deutério ( $^2\text{H}$ ), um isótopo de hidrogênio composto por um próton e um nêutron. Esse processo também gera a liberação de um pósitron ( $e^+$ ) e um neutrino ( $\nu_e$ ). Por uma reação em cadeia, o deutério combina-se com um próton ( $^1\text{H}$ ), produzindo hélio-3 ( $^3\text{He}$ ) e emitindo radiação gama. Estes átomos de ( $^3\text{He}$ ) combinam-se, originando hélio-4 ( $^4\text{He}$ ) e liberam mais dois prótons ( $^1\text{H}$ ), assegurando a continuidade da reação. O resultado final das reações em cadeia, é combinação de quatro átomos de hidrogênio com um átomo de hélio ( $^4\text{He}$ ), emitindo energia.

Quando dois átomos de hidrogênio  $^1\text{H}$  se fundem, um neutrino é emitido, representando pouco mais de 1% da energia liberada. A energia produzida nas fases seguintes da reação é parte liberada como energia cinética nas partículas resultantes e parte dissipada como fótons de raios gama a partir da fotosfera, superfície visível do sol, essa energia é emitida como radiação eletromagnética, a principal fonte de energia da terra e do sistema solar.

## 2.1.2 TIPOS DE ENERGIA SOLAR

A radiação solar que atinge a superfície terrestre pode ser categorizada em três segmentos distintos: direta, difusa e refletida. A primeira destas, radiação direta, provém diretamente da fonte solar, sem interferências atmosféricas significativas. Radiação difusa refere-se aquela que, embora originada no sol, sofre reflexões na atmosfera antes de ser dispersa na superfície terrestre. Por fim, a radiação refletida é aquela que é rebatida por superfícies terrestres, como construções ou corpos d'água.

A soma destas radiações é o que se denomina "irradiância solar global". E, a partir da metodologia empregada para a captação e utilização dessa irradiância, as tecnologias podem ser

classificadas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), grupo de cientistas mantido pela Organização das Nações Unidas (ONU) para supervisionar e aconselhar sobre a ciência global relacionada às mudanças climáticas, divulgou em 2011 um estudo especial focado em Energias Renováveis e na Mitigação das Alterações Climáticas. Nesse estudo, os autores Edenhofer et al. (2011) categorizaram a energia solar direta em cinco grupos, com base em suas aplicações:

#### 2.1.2.1 ENERGIA SOLAR PASSIVA

Refere-se à captação e utilização da energia do sol sem a necessidade de mecanismos mecânicos ou eletrônicos. Este sistema envolve a estratégia de seleção de materiais e designs arquitetônicos que potencializam o aproveitamento da radiação solar durante todo o ano, direcionando-a especialmente para a iluminação e a manutenção térmica de edificações.

A arquitetura bioclimática visa harmonizar as edificações com as condições climáticas e características ambientais locais. O objetivo principal é captar energia diretamente do ambiente, maximizando os benefícios da luz e calor provenientes da radiação solar e da ventilação natural (PINHO; GALDINO, 2014).

#### 2.1.2.2 ENERGIA SOLAR ATIVA

Carateriza-se pela implementação de sistemas específicos para a captação, absorção e transformação da radiação solar em energia elétrica. Ao referir-se a técnicas ativas de energia solar, aborda-se dispositivos como os coletores solares térmicos, células fotovoltaicas e sistemas de energia solar concentrada (SANTOS, 2019).

#### 2.1.2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica refere-se à conversão de luz em eletricidade através do uso de tecnologias solares que exploram o efeito fotovoltaico. Este efeito ocorre quando a luz incide sobre um semicondutor, como o silício, gerando uma separação de cargas elétricas que gera uma diferença de potencial, tensão elétrica. Quando conectadas a uma carga, essas células geram corrente elétrica. Existem várias tecnologias fotovoltaicas, sendo as células de silício monocristalino, policristalino e as células de película fina as mais difundidas. A eficiência da conversão pode alcançar valores próximos a 25% para células de silício monocristalino e 20.03% para policristalino (EDENHOFER et al., 2011).

#### 2.1.2.4 COMBUSTÍVEL SOLAR

Combustíveis solares referem-se à produção de compostos químicos com alto potencial energético a partir das formas de radiação solar, utilizando matérias-primas abundantes

como água, dióxido de carbono CO<sub>2</sub> e nitrogênio N<sub>2</sub>. Esta conversão, muitas vezes descrita como fotossíntese artificial, busca imitar os processos naturais para transformar a energia solar em energia química visando sustentabilidade, é tanto transportável quanto armazenável. Além de sua capacidade de produção de hidrogênio através da luz solar, há um interesse crescente em transformar CO<sub>2</sub> e outras pequenas moléculas em combustíveis líquidos. Em essência, os combustíveis solares representam uma associação de tecnologia solar e química para produzir formas de combustíveis renováveis e amigáveis ao meio ambiente.

#### 2.1.2.5 GERAÇÃO HELIOTÉRMICA

Sistemas de energia solar térmica concentrada, *Concentrating solar power* (CSP), também conhecidos como sistemas solares térmicos ou heliotérmicos, utilizam espelhos ou lentes para concentrar a radiação solar como fonte de energia. Essa energia é convertida em calor para geração de vapor ou eletricidade por meio de máquinas térmicas. Os concentradores possuem uma área significativamente maior que o receptor, a parte quente do sistema onde a energia concentrada é direcionada. Dessa forma, a energia solar absorvida é amplificada proporcionalmente à relação entre as áreas dos concentradores e do receptor.

Muitas vezes equipados com sistemas seguidores que podem ajustar sua inclinação ao longo do dia, acompanhando a posição do sol para garantir uma incidência adequada de energia na área desejada.

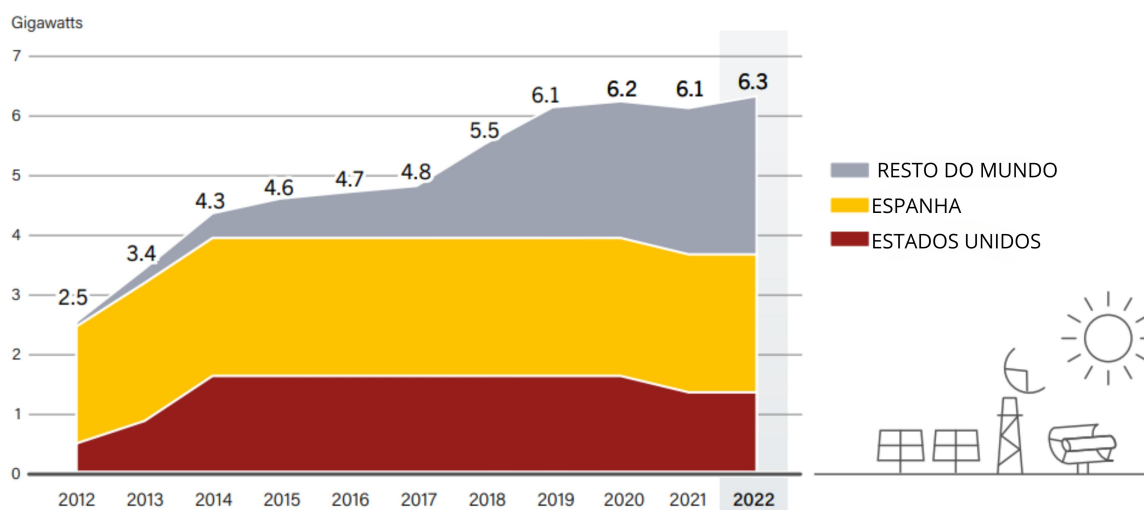
Os primeiros avanços significativos no estudo de sistemas heliotérmicos ocorreram entre o final do século XIX e o início do século XX. Destacam-se os trabalhos de Augustin Mouchot, John Ericsson, Frank Shuman e Giovanni Francia, que exploraram a aplicação desses sistemas para a produção de vapor e aplicação em diversos propósitos, como o bombeamento de água (SANTOS, 2019 apud LOVEGROVE; STEIN, 2012).

Devido à sua operação com o Sol como fonte de calor, os sistemas heliotérmicos podem ser facilmente hibridizados para utilizar outras fontes de calor quando a energia solar não está disponível. Além disso, esses sistemas podem empregar dispositivos auxiliares de armazenamento térmico para acumular energia e utilizá-la durante períodos de alta demanda ou quando a energia solar não está acessível.

De acordo o relatório anual "*Renewables 2023 Global Status Report Collection*" da instituição multi governamental Rede de Políticas de Energias Renováveis para o Século XXI, a REN21, em 2022, a capacidade global instalada de energia solar térmica concentrada (CSP) cresceu em 200 MW, totalizando 6,3 GW, após um declínio em 2021, como ilustra a Figura 1. Esse aumento reflete um novo impulso no setor, com ênfase em mercados emergentes como Chile, China, Israel, Marrocos, África do Sul e Emirados Árabes Unidos. Destaca-se a entrada em operação de uma instalação de coletores parabólicos de 200 MW nos Emirados Árabes Unidos, parte de uma usina de energia híbrida que, ao ser concluída, será a maior instalação de CSP do mundo, alcançando 700 MW. A China se destaca na construção de projetos CSP, com

pelo menos 30 em diferentes estágios, e 14 deles, somando 1,4 GW, programados para iniciar operações em 2023.

Figura 1 – Capacidade Global de Energia Solar Térmica Concentrada, por País e Região, 2012-2022.



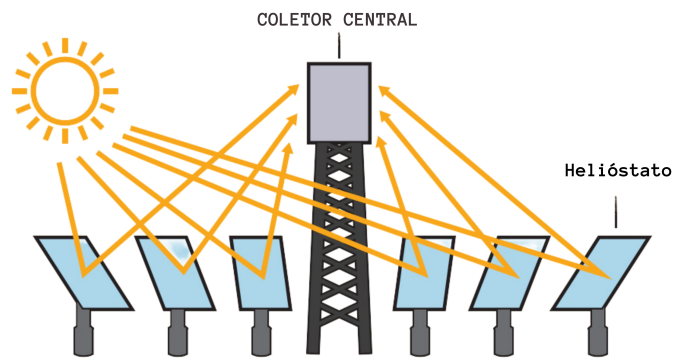
Fonte: Adaptado de REN21 (2023).

Na Espanha, que não adicionou capacidade CSP desde 2013, os desafios persistiram em 2022. O país pretendia conceder 220 MW em um leilão de energia renovável, mas nenhum incremento foi alcançado devido a divergências de preço com a indústria e incertezas sobre o acesso à rede elétrica. Embora a Espanha almeje dobrar sua capacidade de CSP para 4,8 GW até 2025 e 7,3 GW até 2030, nenhum projeto estava em construção em 2022. Por outro lado, a Itália tinha 8 MW em construção, com planos de adicionar 880 MW até 2030. Na África do Sul, a planta CSP Redstone, com capacidade de 100 MW, estava em construção e prevista para conclusão em 2023. Botsuana progrediu em um processo de licitação para uma planta CSP de 200 MW, enquanto um estudo de viabilidade foi conduzido para uma instalação de CSP na Namíbia (REN21, 2023).

#### TIPOS DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA:

- Sistema de torre central: *power tower*, *central tower* ou *central receiver*, é um tipo de sistema de geração heliotérmica que consiste na disposição de espelhos, chamados helióstatos, que direcionam a radiação solar para um receptor no topo de uma torre, Figura 2. Durante o dia, os helióstatos ajustam suas posições para maximizar a incidência solar no receptor, que contém um fluido térmico que absorve o calor da radiação solar concentrada, utilizado na produção de vapor. Esse vapor aciona uma turbina conectada a um gerador, como das usinas termoelétricas. Temperaturas superiores a 1.000°C podem ser alcançadas, tornando os receptores centrais adequados para alimentar turbinas a vapor avançadas e ciclos de turbinas a gás (Brayton) (EDENHOFER et al., 2011).

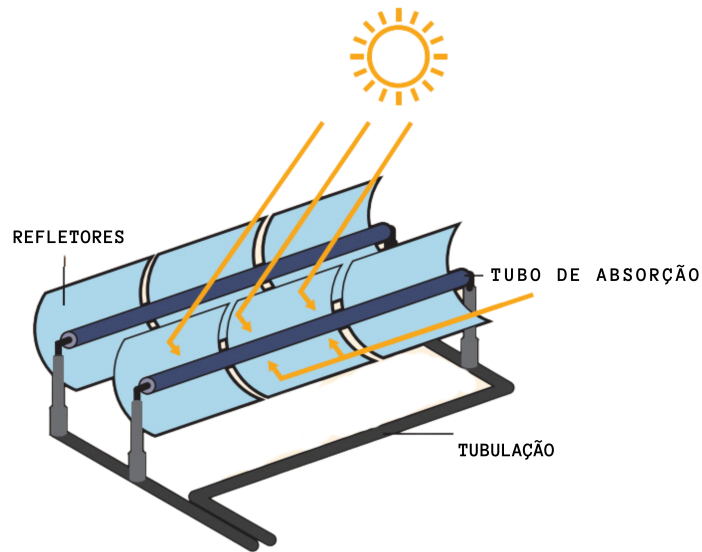
Figura 2 – Geração Heliotérmica por torre central.



Fonte: Adaptado de Edenhofer et al. (2011).

- Sistema de calha: Em concentradores tipo calha, fileiras de refletores parabólicos concentram de 70 a 100 vezes a irradiância solar em um elemento de coleta de calor situado ao longo da linha focal do refletor como dispõe a Figura 3. A inclinação das calhas é ajustada ao longo do dia, por meio de um sistema seguidor, para manter a máxima incidência possível de radiação solar sobre o receptor, geralmente orientado de norte a sul. O receptor é constituído por um tubo interno de aço, revestido com uma superfície seletiva solar, e um tubo externo de vidro, com um espaço entre eles. O fluido de trabalho para a transferência de calor circula pelo tubo de aço e é aquecido a aproximadamente 390°C. O fluido aquecido nas fileiras de calhas é conduzido por um trocador de calor para gerar vapor em um gerador convencional de turbina a vapor (ciclo Rankine). A ocupação de grandes áreas são comuns a esses sistemas, da ordem de 2 km<sup>2</sup> para uma usina de 100 MW, dependendo da tecnologia do coletor e presumindo a ausência de armazenamento (EDENHOFER et al., 2011).

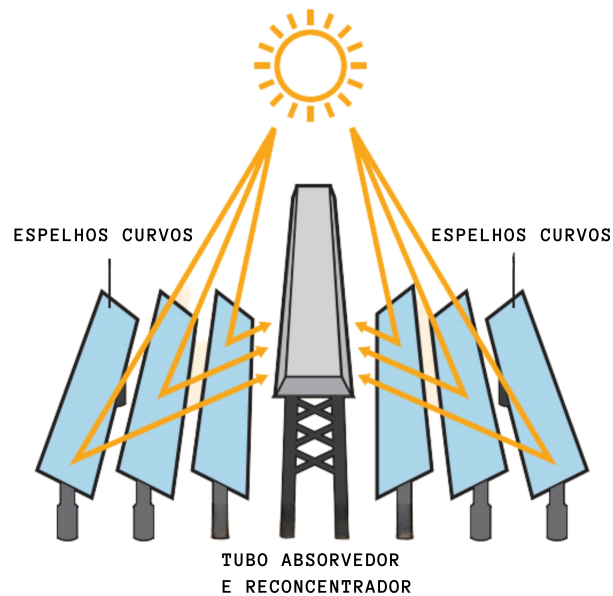
Figura 3 – Geração Heliotérmica por sistema de calha.



Fonte: Adaptado de Edenhofer et al. (2011).

- Linear Fresnel: A configuração dos sistemas de refletores lineares Fresnel aproxima-se dos sistemas de calha parabólica. Diferencia-se porque no lugar dos espelhos com perfis parabólicos, este sistema utiliza espelhos planos para concentrar a radiação solar em uma linha focal, onde está localizado o receptor, Figura 4, o que permite que as partes móveis sejam montadas mais próximas ao solo, reduzindo assim os custos estruturais. Análogo ao funcionamento do sistema de calha parabólica, um fluido de trabalho para transferência de calor circula ao longo do tubo receptor absorvendo a energia em forma de calor e a conduzindo para um sistema gerador. Os espelhos planos utilizados neste tipo de sistema possibilitam uma maior superfície reflexiva em uma menor área ocupada, quando comparados com os concentradores de calha parabólica, tendo um efeito análogo ao das lentes fresnel, o que justifica a atratividade destes refletores, aliado a menores custos de instalação por metro quadrado, que podem ser mais baixos do que os sistemas de calhas. No entanto, o desempenho óptico é inferior ao de uma calha.

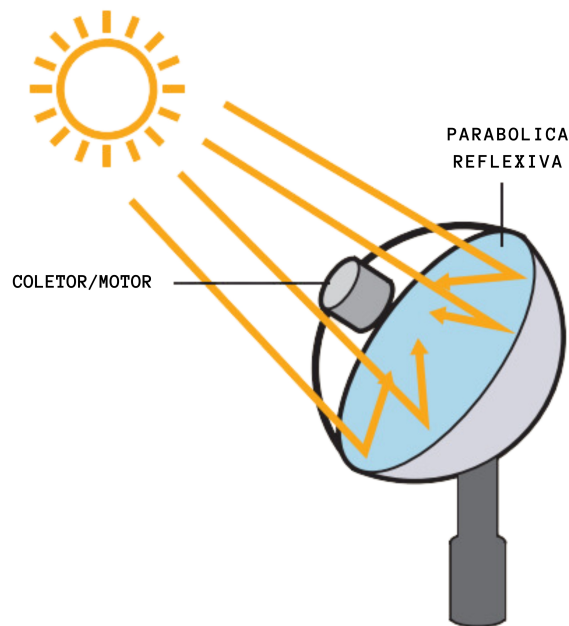
Figura 4 – Geração Heliotérmica por concentradores do tipo lineares fresnel.



Fonte: Adaptado de Edenhofer et al. (2011).

- Sistema de concentrador parabólico: os sistemas de concentradores parabólicos, conhecidos como *Dish Systems*, de acordo Edenhofer et al. (2011) incluem um refletor óptico ideal, portanto, são adequados para aplicações que requerem altas temperaturas. Os refletores são paraboloides e concentram a irradiação solar em um receptor localizado no ponto focal, como ilustra a Figura 5, com o receptor movendo-se com o disco, em um sistema de rastreamento solar. Comumente essas paraboloides de superfícies reflexivas são utilizados para acionar motores Stirling a 900°C, tecnologia conhecida como *Dish Stirling*, e também para geração de vapor.

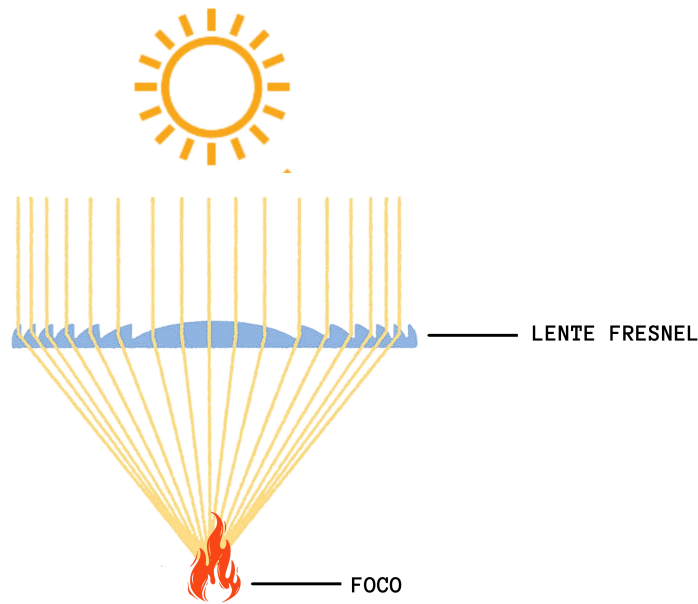
Figura 5 – Geração Heliotérmica por concentradores Parabólicos.



Fonte: Adaptado de Edenhofer et al. (2011).

- Lente fresnel: Lentes convencionais são caras e impraticáveis de serem fabricadas em larga escala e grandes dimensões. As lentes Fresnel superam essas dificuldades e tem sido amplamente utilizadas em sistemas de concentração solar. Uma lente de Fresnel é fabricada como uma série de degraus concêntricos, Figura 6, como os graus correspondente aqueles encontrados em lentes padrão, mas com todos os degraus mantidos em uma pequena espessura. Um material polimérico é geralmente utilizado. Normalmente são sistemas que requerem rastreamento preciso do sol em dois eixos (LOVEGROVE; STEIN, 2012).

Figura 6 – Concentrador de lente fresnel.



Fonte: Autor(2023).

## 2.2 MOTOR STIRLING

Ao que se refere do motor *Stirling*, foi inventado pelo escocês Robert Stirling em 1816 (registrado no livro de patentes do Reino Unido, número 4081) que considerava os motores a vapor da época potencialmente perigosos, visto o alto índice de acidentes de trabalho por explosão, e queimaduras graves devido a alta temperatura do vapor. Embora tenha sido inventado há mais de dois séculos, o motor *Stirling*, experimentou um ressurgimento no desenvolvimento a partir da década de 1930, impulsionado pela busca da empresa holandesa Philips por um motor silencioso e compacto para geradores de energia. Os estudos da Philips levaram à consideração de outros fluidos de trabalho, como hélio e hidrogênio. Ao longo do século, vários fabricantes demonstraram interesse no motor Stirling, obtendo licenças da Philips para diversas aplicações. Empresas automotivas como Ford e General Motors exploraram sua aplicação, visando consumos de combustível mais baixos e emissões reduzidas. No setor naval, a MWM construiu motores para geradores de submarinos. A produção e operação do motor Stirling revelou limitações à época, incluindo um custo/potência elevado em relação aos motores de combustão interna e vapor, respostas desfavoráveis às mudanças de relação de transmissão e variação de torque e velocidade, assim como problemas de vedação, resultando no gradual abandono de seu desenvolvimento. Em 1969, o professor William Beale introduziu uma inovação significativa no motor Stirling com o chamado "êmbolo livre", eliminando a necessidade de vedação nos pistões e melhora na lubrificação da biela-manivela. Essa invenção trouxe avanços consideráveis, e projetos subsequentes foram desenvolvidos, especialmente pela NASA, que reconheceu o potencial do motor Stirling de êmbolo livre para operar em ambientes isentos de oxigênio,

com alta confiabilidade e eficiência (RODRIGUES, 2017).

Nas duas últimas décadas com o avanço das tecnologias de materiais e manufatura o estudo desta máquina térmica têm voltado às pautas das pesquisas acadêmicas, consoante a isso atrela-se o desenvolvimento sustentável buscando recursos ambientalmente amigáveis, o que impulsiona a associação de motores Stirling com energia solar térmica.

### 2.2.1 CICLO DE CARNOT

O ciclo de Carnot estabelece conceitos fundamentais na área da termodinâmica, descreve o conceito teórico para uma máquina térmica ideal. Desenvolvido pelo físico francês Nicolas Léonard Sadi Carnot no século XIX, esse ciclo é uma referência para a eficiência máxima atingível por qualquer máquina térmica que opere entre duas fontes de temperatura, uma quente e outra fria. Composto por quatro processos totalmente reversíveis, o ciclo de Carnot funciona a partir do fornecimento isotérmico de calor, expansão isentrópica, rejeição isotérmica de calor e compressão isentrópica. Os diagramas P-v e T-s que ilustram um ciclo de Carnot são visualizados na Figura 7.

Figura 7 – Diagramas de propriedades para o Ciclo de Carnot.

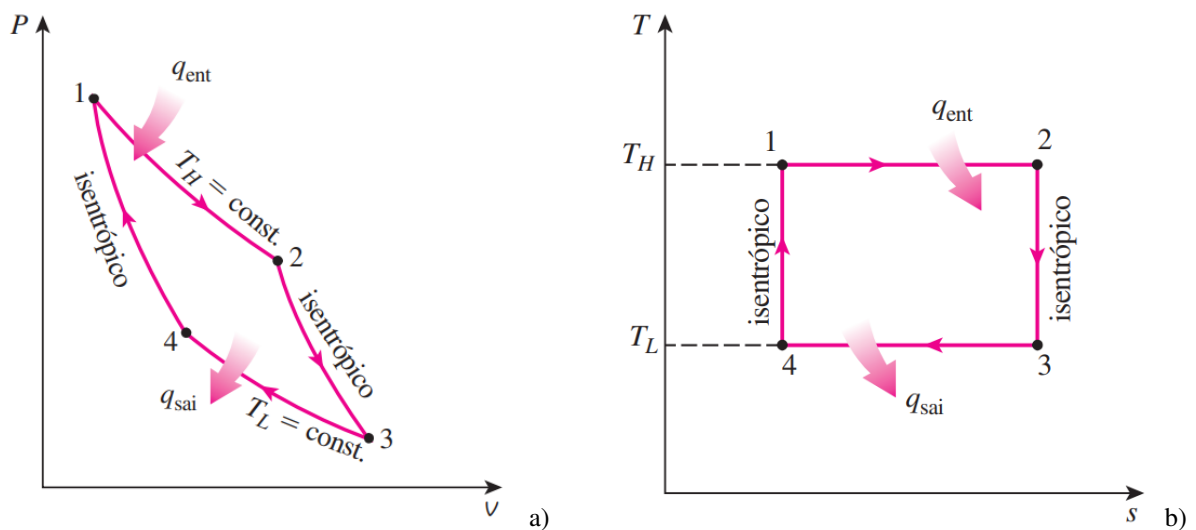


Diagrama P-V de um ciclo de Carnot.

Diagrama T-S de um ciclo de Carnot.

Fonte: Çengel e Boles (2013).

Esse ciclo pode ser realizado em um sistema fechado, utilizando um arranjo pistão-cilindro, ou em um sistema com fluxo em regime permanente, envolvendo duas turbinas e dois compressores, e o fluido de trabalho pode ser um gás ou um vapor. O ciclo de Carnot se destaca como o ciclo de maior eficiência que pode ser implementado entre uma fonte de calor, "temperatura alta"  $T_h$  e um sumidouro, "temperatura baixa"  $T_l$ . Assim como qualquer outra máquina térmica, o motor Stirling está sujeito às limitações de eficiência estabelecidas pelo Teorema de Carnot. Esse teorema afirma que uma máquina térmica não pode gerar mais trabalho do que a

quantidade de calor que recebe, como descrevem Çengel e Boles (2013). O rendimento térmico teórico de uma máquina baseada no ciclo de Carnot equaciona-se:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_l}{T_h} \quad (1)$$

### 2.2.2 RENDIMENTO DO CICLO STIRLING

O ciclo Stirling é completamente reversível, à semelhança do ciclo de Carnot. Portanto, de acordo com o princípio de Carnot, ambos devem apresentar a mesma eficiência térmica ao operarem dentro dos mesmos limites de temperatura. Logo:

$$\eta_{stirling} = \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_l}{T_h} \quad (2)$$

Na prática, a realização de uma transferência de calor isotérmica reversível é uma utopia devido à necessidade de trocadores de calor extremamente grandes e ao tempo significativo envolvido, o que torna impraticável a construção de uma máquina que opere com eficiência próxima ao ciclo de Carnot. O valor real do ciclo de Carnot para o Stirling reside em sua função como referência para comparação entre ciclos ideais e reais. A eficiência térmica do ciclo de Carnot é determinada exclusivamente pelas temperaturas da fonte de aquecimento e de resfriamento. A expressão para a eficiência térmica destaca que a eficiência aumenta com o aumento da temperatura média de fornecimento de calor ou a redução da temperatura de rejeição de calor. No entanto, existem limitações práticas nas temperaturas de operação, sendo a temperatura mais alta restrita pela resistência dos componentes da máquina térmica e a temperatura mais baixa limitada pelo meio de resfriamento, como água ou ar atmosférico (ÇENGEL; BOLES, 2013).

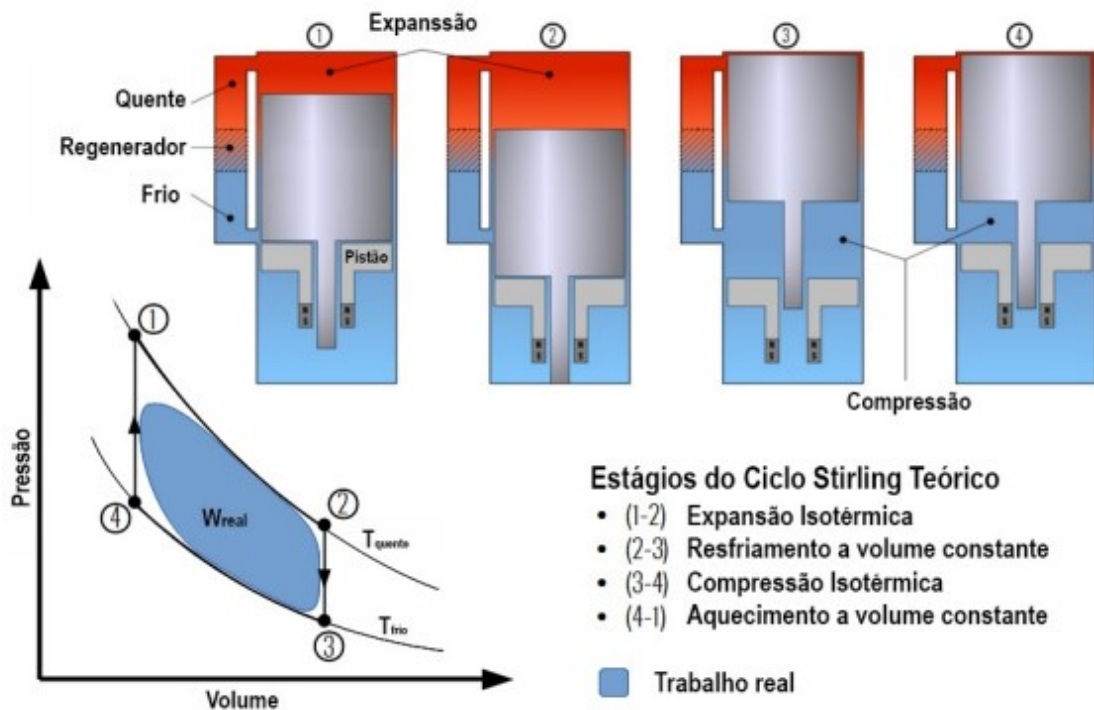
### 2.2.3 CICLO DE STIRLING

Este é ciclo de funcionamento de um tipo de máquina térmica de combustão externa que funciona com um ciclo termodinâmico regenerativo fechado. O motor *Stirling* é composto por duas câmaras de trabalho (podendo apresentar a configuração de câmara unitária) relativos aos volumes de controle quente e frio. O fluido de trabalho, geralmente ar ou hélio, é contido em volume restrito, o ciclo começa quando o fluido de trabalho no "cilindro quente" é aquecido, ele se expande e desloca o pistão. Na etapa seguinte, o pistão é movido para a câmara fria, onde o fluido de trabalho é resfriado e comprimido. O pistão é então movido de volta para a câmara quente, onde o processo de expansão é repetido.

O ciclo *Stirling* ilustrado na Figura 8 é composto por quatro etapas, segundo Rodrigues (2017), são descritas da seguinte forma:

- Expansão isotérmica (1-2): Nessa fase, o pistão de expansão volta atrás enquanto o de compressão permanece no curso máximo. Isso resulta em um aumento no volume do fluido e, portanto, uma redução na pressão. É nesse momento que a energia é produzida como resultado da pressão elevada exercida sobre o pistão de expansão.
- Arrefecimento isocórico (2-3): Nessa fase, o pistão de compressão começa a retornar enquanto o pistão de expansão avança, mantendo o volume interno do motor inalterado. Além disso, o fluido passa pelo dissipador, que permite a sua resfriamento e a contração térmica, levando a uma redução na pressão.
- Compressão isotérmica (3-4): Durante essa fase, o pistão de expansão atinge o ponto mais baixo do curso, enquanto o pistão de compressão avança em sua direção, reduzindo o volume do fluido gasoso e aumentando a sua pressão.
- Aquecimento isocórico (4-1): Durante essa fase, o pistão de compressão avança, mas é compensado pelo retrocesso do pistão de expansão, mantendo-se constante o volume. Nesse intervalo de tempo, o fluido de trabalho recebe calor à medida que passa pelo aquecedor, aumentando a pressão pela dilatação.

Figura 8 – Ciclo Stirling.



Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, 2017).

## 2.2.4 ANÁLISES TEÓRICAS

Nesta seção, apresentam-se duas metodologias para análises do motor Stirling: a análise isotérmica ideal de Schmidt e a análise adiabática ideal. A análise de Schmidt é a principal abordagem de primeira ordem, introduzida por Gustav Schmidt em 1871, destacando uma variação senoidal no trabalho do motor. Essa teoria respalda-se sobre conhecimentos de compressão e expansão isotérmica, a partir da regeneração perfeita.

É importante ressaltar que, por ser uma análise teórica, são feitas considerações para um ciclo ideal. Na prática, o desempenho do motor geralmente fica abaixo de 60% do desempenho previsto por estas abordagens. No entanto, são mais realistas do que o ciclo de Stirling ideal. O desempenho do motor pode ser calculado usando um diagrama P-V (pressão versus volume), sendo o volume do motor determinado pelas dimensões internas dos cilindros, enquanto a massa do gás de trabalho e a temperatura são obtidas a partir da literatura existente (SANTOS, 2019).

As variações de volume se aproximam mais de um processo adiabático do que de um processo isotérmico, influenciando diretamente o fluxo de energia no motor. A análise adiabática do motor Stirling, ao contrário da análise isotérmica de Schmidt, leva em consideração as variações de volume como um processo adiabático, aproximando assim os resultados das características observadas no funcionamento de um motor Stirling real. Tanto na análise de Schmidt quanto na análise adiabática, são consideradas as transferências de energia e massa em uma série de volumes de controle (URIELI; BERCHOWITZ, 1984 apud SANTOS, 2019).

### 2.2.4.1 ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL

Ao considerar a curva ideal, observa-se na Figura 8, que os volumes nos pontos 1 e 4 são iguais, assim como nos pontos 2 e 3. Diante disso, é possível restringir a estimativa para dois volumes de interesse, o volume máximo  $V_3$  e o Volume mínimo em  $V_1$ . A diferença entre estes volumes está relacionada com o curso do pistão, o quanto ele pode variar entre o volume máximo e mínimo. Desta forma, podemos expressar a Equação 3 da seguinte maneira:

$$V_3 - V_1 = sA \quad (3)$$

Onde  $s$  é o deslocamento do pistão e  $A$  é a área da seção transversal do mesmo. Ao observar o comportamento dos pistões ao longo do ciclo, é possível definir o volume mínimo  $V_1$  como a soma dos volumes das partes esféricas dos cilindros (as extremidades dos cilindros do motor apresentam formato esférico, conforme ilustrado na Figura 18), e da metade do volume de deslocamento do pistão. Sendo assim  $V_1$  pode ser definido pela Equação 4:

$$V_1 = \frac{4\pi r^3}{3} + \frac{1}{2}sA \quad (4)$$

Substituindo as Equações 4 e 3 pode-se obter  $V_3$ :

$$V_3 = V_1 + (V_3 - V_1) \quad (5)$$

Uma vez definidas as especificações de volume do motor, é preciso considerar a Equação 6, equação dos gases ideais, para obter todos dados em cada ponto do Diagrama P-V.

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

Em que:

$P$  é a pressão do gás;

$V$  é o Volume do gás;

$n$  é a quantidade de matéria (mol);

$R$  é a constante universal dos gases ideais;

$T$  é a temperatura absoluta do gás.

A Tabela 1 apresenta os procedimentos utilizados para obter o número de mols ( $n$ ), Volume ( $V$ ), temperatura ( $T$ ) e pressão ( $P$ ) para cada estado do ciclo:

Tabela 1 – Variáveis de estado ciclo *Stirling*.

	1	2	3	4
n (mol)	$P_3V_3/RT_3$	$P_3V_3/RT_3$	$P_3V_3/RT_3$	$P_3V_3/RT_3$
V (L)	Calculado a partir das dimensões do motor	$= V_3$	Calculado a partir das dimensões do motor	$=V_1$
T (K)	Temperatura média medida no cilindro quente	$=T_1$	Temperatura média medida no cilindro frio	$=T_3$
P (atm)	$P_1=nRT_1/V_1$	$P_2=nRT_2/V_2$	Assume-se a pressão atmosférica ideal	$P_4=nRT_4/V_4$

Fonte: Autor(2023).

Uma vez de posse das variáveis de estado, é possível analisar o processo isotérmico e calcular o trabalho em cada estágio. Nos trechos do ciclo onde não há mudança de volume podemos considerar o trabalho nulo, já nas curvas de processo isotérmico o trabalho pode ser obtido através da Equação:

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad (7)$$

Onde  $W$  é o trabalho realizado, expresso em Joule (J),  $R$  é a constante universal dos gases ideais igual a  $8,3144621 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ , para obter a análise dimensional desejada e  $V_f$  e  $V_i$  são, respectivamente, o volume final e inicial. Essa equação é utilizada por se tratar de uma análise idealizada, por isso, assume-se que esses estágios são processos isotérmicos ideais.

Já a variação de energia interna ( $\Delta U$ ), pode ser considerada nula nos estágios em que a temperatura permanece constante, nos demais pode ser obtida através da Equação 8.

$$\Delta U = nC_v(T_f - T_i) \quad (8)$$

Onde  $T_f$  e  $T_i$  são, respectivamente a temperatura no estado final e temperatura no estado inicial, já  $C_v$  em  $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ , pode ser obtido através da Equação 9.

$$C_v = \frac{2}{5}R \quad (9)$$

Quanto ao calor ( $Q$ ) envolvido nesse processo podemos considerar a Equação:

$$Q = \Delta U + W \quad (10)$$

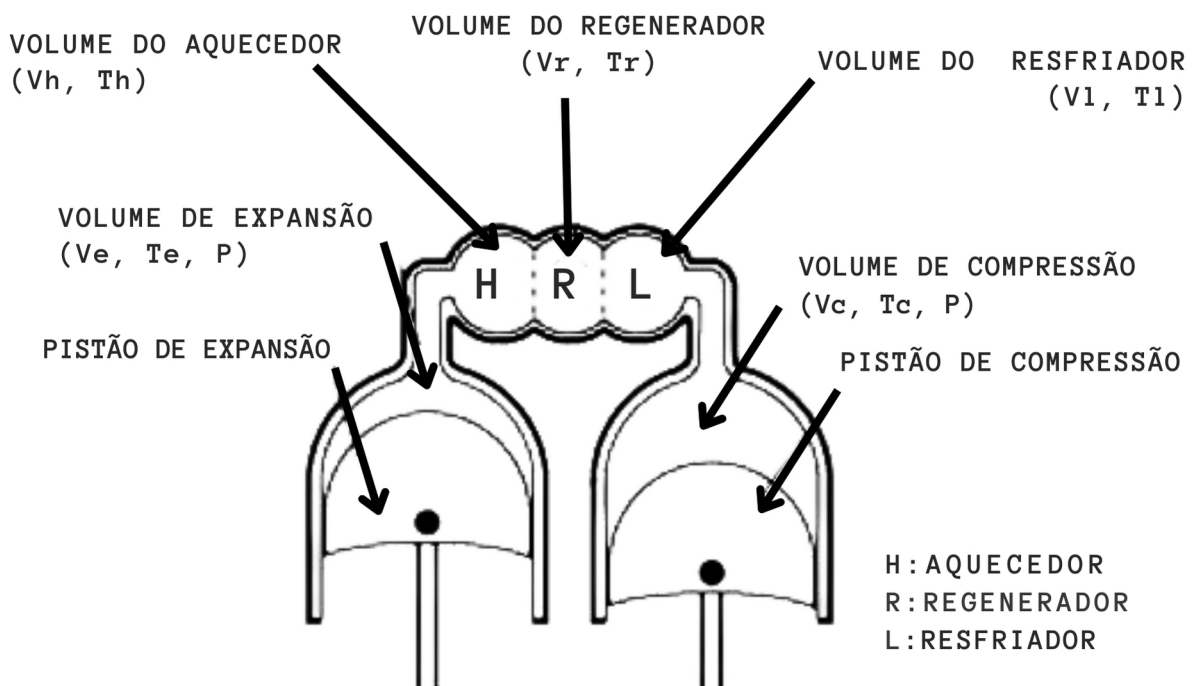
Por fim, a eficiência ideal ( $\epsilon$ ), para o motor *stirling* utilizado, através dessa análise, é obtida pela razão entre o módulo do trabalho líquido ( $W_{liq}$ ) sobre o calor de entrada ( $Q_{in}$ ), conforme a equação:

$$\epsilon = \frac{|W_{liq}|}{Q_{in}} \quad (11)$$

#### 2.2.4.2 ANÁLISE DE SCHMIDT

Na análise de Schmidt, baseado no Modelo do Gás Ideal, o motor Stirling é estimado como uma associação de volumes de controle: volume de compressão  $V_c$ , expansão  $V_e$ , resfriador  $V_l$ , aquecedor  $V_h$ , e regenerador  $V_r$ . A temperatura dos volumes de compressão e de expansão são consideradas constantes e respectivamente iguais às do resfriador e do aquecedor. A disposição dos volumes de controle estudados está ilustrado na Figura 9:

Figura 9 – Esquema de um motor Stirling tipo alfa.



Os parâmetros de entrada para análise de Schmidt são obtidos através do equacionamento dos fenômenos de compressão e expansão de um gás ideal, Equação 6, assim como da Equação 12 para abordagem a partir dos valores desejados de massa, demandada pela análise de Schmidt. Os dados sobre os volumes de controle são coletados da análise adiabática ideal, a partir da metodologia resumida na Tabela 1.

$$PV = mRT \quad (12)$$

Onde  $P$  é a pressão do gás,  $V$  o volume,  $R$  é a constante dos gases ideais e  $T$  é a temperatura. A partir da Equação 13, a massa de um gás ideal contida em um determinado volume de controle, é dada por:

$$m = \frac{PV}{RT} \quad (13)$$

A análise isotérmica ideal, é iniciada a partir do balanço de massa dos gases ideais nos volumes de controle na máquina de Stirling. A massa total de gás no motor  $M_{total}$  é o somatório das massas em cada um dos volumes:

$$M_{total} = m_c + m_l + m_r + m_h + m_e \quad (14)$$

Sendo  $m_c$  é a massa de gás no volume de compressão,  $m_l$  no resfriador,  $m_r$  no regenerador,  $m_h$  no aquecedor, e  $m_e$  volume de expansão.

Para análise de Schmidt considera-se uma variação senoidal do volume de trabalho, ilustrada na Figura 10. A partir dessa consideração, as variações senoidais dos volumes de compressão e de expansão para o motor Stirling são dadas pelas equações:

$$V_c = V_{clc} + \frac{V_{swc}(1 + \cos \theta)}{2} \quad (15)$$

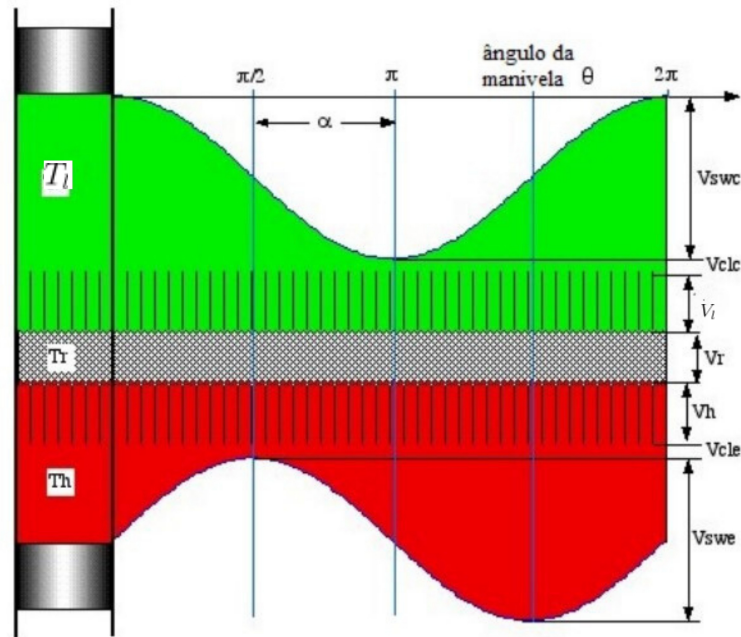
e

$$V_e = V_{cle} + \frac{V_{swe}(1 + \cos(\theta + \alpha))}{2} \quad (16)$$

Onde:

- $V_{clc}$ : Volume morto no espaço de compressão.
- $V_{swc}$ : Volume varrido pelo curso do pistão no espaço de compressão.
- $V_{cle}$ : Volume morto no espaço de expansão.
- $V_{swe}$ : Volume varrido pelo curso do pistão no espaço de expansão.

Figura 10 – Deslocamento senoidal dos pistões do motor Stirling.



Fonte: Adaptado de (URIELI; BERCHOWITZ, 1984 apud SANTOS, 2019).

O volume morto é delimitado pela estrutura da cavidade interna do motor e pela posição máxima do pistão em seu curso no cilindro, também conhecido como Ponto Morto Superior (PMS). O ângulo  $\alpha$  é a medida do ângulo de fase entre o momento em que ocorre o valor mínimo do volume de expansão e o valor mínimo do volume de compressão, enquanto  $\theta$  é o ângulo da manivela.

A pressão média do gás no motor ( $P_{med}$ ) é obtida através de:

$$P_{med} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} P d\phi \quad (17)$$

Onde  $P$ , pressão instantânea do gás é obtido através da Tabela 1.

Considerando um regenerador ideal, o balanço de energia é nulo. Como não há variação de volume no aquecedor e no resfriador, nenhum trabalho é realizado nesses componentes. Assim, as únicas variações de energia no sistema ocorrem nos volumes de compressão e de expansão, resultando em:

$$Q_c = W_c \quad (18)$$

$$Q_e = W_e \quad (19)$$

onde  $Q_c$  é o calor trocado pelo gás no volume de compressão,  $W_c$  é o trabalho realizado pelo gás no volume de compressão,  $Q_e$  é o calor trocado pelo gás no volume de expansão e  $W_e$  é o trabalho realizado pelo gás no volume de expansão.

O trabalho é realizado pelo motor por meio da variação do volume do fluido de trabalho. O trabalho líquido realizado pelo motor é a soma algébrica do trabalho realizado nos volumes de compressão e de expansão. Portanto, o trabalho líquido ao longo de um ciclo completo é:

$$W_{liq} = W_c + W_e \quad (20)$$

Sabendo-se que o trabalho de fronteira resultante da variação no volume é dado por:

$$W = \int P dV \quad (21)$$

Temos que, para um ciclo:

$$Q_c = W_c = \int_0^{2\pi} P \frac{dV_c}{d\theta} d\theta \quad (22)$$

$$Q_e = W_e = \int_0^{2\pi} P \frac{dV_e}{d\theta} d\theta \quad (23)$$

A eficiência térmica do motor ( $\eta_m$ ) é definida como a razão entre o trabalho realizado pelo motor ( $W_{liq}$ ), conforme Equação 20, e o calor suprido externamente para o motor ( $Q_m$ ). Nesta análise, consideramos que o calor suprido externamente para o motor é igual ao trabalho realizado pelo volume de expansão. Assim, a eficiência do motor é dada por:

$$\eta_m = \frac{W_{liq}}{Q_m} \quad (24)$$

Visto que a análise de Schmidt é baseada no modelo isotérmico ideal, ao manipular a Equação 24 substituindo as Equações 20 e 23, a eficiência térmica do motor pode ser reduzida à eficiência de Carnot:

$$\eta_m = 1 - \frac{T_l}{T_h} \quad (25)$$

E a potência do motor pode ser calculada como o produto do trabalho líquido por ciclo pela velocidade de rotação do motor:

$$\dot{W} = W_{liq} \cdot N \quad (26)$$

Onde  $\dot{W}$  é a potencia obtida,  $W_{liq}$  trabalho liquido, e  $N$  a velocidade de rotação.

## 2.2.5 REGENERADOR

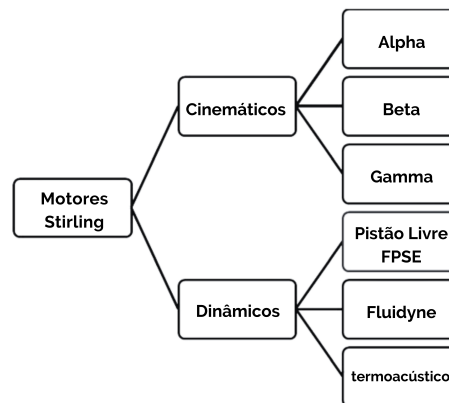
O regenerador desempenha um papel essencial no funcionamento do motor Stirling. Trata-se de um componente interno de troca de calor, cuja função principal é armazenar parte

da energia absorvida pelo fluido de trabalho e transferi-la de volta ao fluido durante os processos isocóricos do ciclo Stirling. O regenerador é caracterizado por sua estrutura altamente porosa, que possui uma capacidade significativa de retenção térmica. A eficiência do motor é diretamente influenciada pela troca térmica no regenerador, quanto maior a troca térmica no regenerador, mais ampla a diferença de temperatura entre os pistões frio e quente do motor, contribuindo para um desempenho mais eficaz (LOVEGROVE; STEIN, 2012). O regenerador está ilustrado na Figura 10, sendo a parte hachurada entre os pistões quente (vermelho) e frio (verde).

## 2.2.6 TIPOS DE MOTORES STIRLING

Em geral, os motores Stirling são classificados quanto a disposição dos seus pistões, as literaturas mais modernas listam em duas principais categorias: cinemática e dinâmica (ZARE; TAVAKOLPOUR-SALEH, 2020). Os cinemáticos incluem três tipos: alfa, beta e gama, que realizam a transmissão de potência com um mecanismo de biela-manivela, podendo ter um gerador acoplado ao eixo para conversão do trabalho em energia elétrica, foco deste estudo. Enquanto os motores Stirling dinâmicos dispõem dos tipos pistão livre, *Fluidyne* e termoacústico (em pesquisa). Um resumo das classificações está disposto na Figura 11

Figura 11 – Classificação dos Motores Stirling.

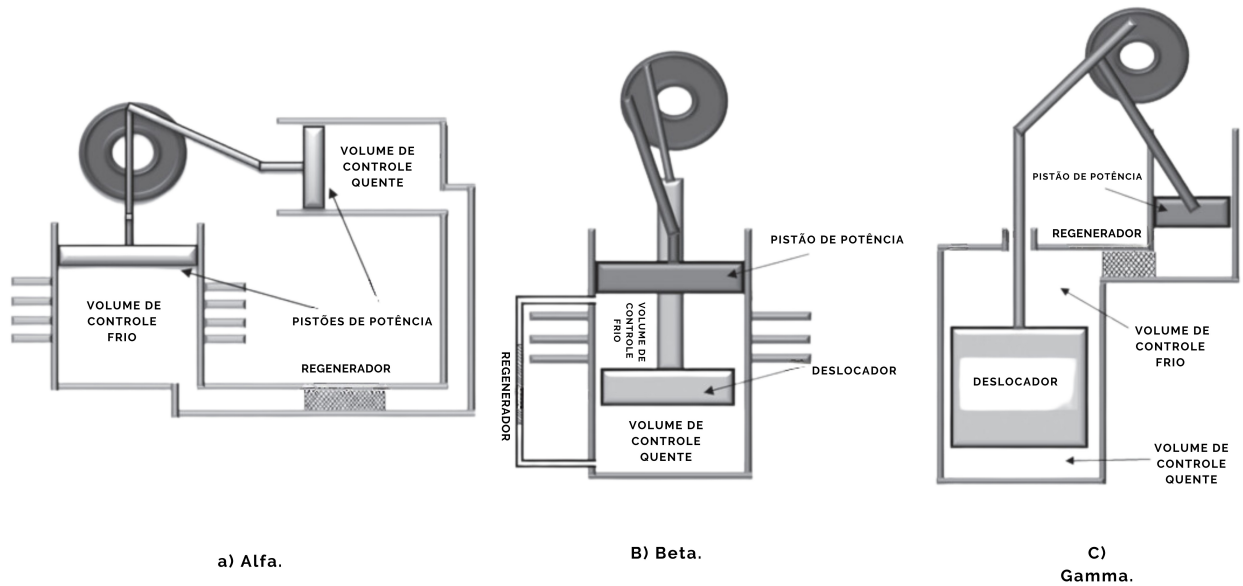


Fonte: Adaptado de Zare e Tavakolpour-Saleh (2020).

### 2.2.6.1 MOTORES STIRLING CINEMÁTICOS

Os motores Stirling cinemáticos são classificados quanto à disposição dos seus pistões em: alfa, beta ou gama, ilustrado na Figura 12. Que embora contenham os mesmos elementos e operem sobre o mesmo ciclo termodinâmico, apresentam algumas diferenças entre si:

Figura 12 – Classificação dos Motores Stirling Cinemáticos.



Fonte: Adaptado de Zare e Tavakolpour-Saleh (2020).

- Alfa: Nesta configuração, dois êmbolos são dispostos, sendo um atribuído para expansão do fluido de trabalho e o outro para sua compressão. Cada cilindro possui sua função de troca de calor, com o aquecedor localizado no cilindro de expansão e o dissipador no cilindro de compressão. O regenerador fica posicionado entre esses trocadores de calor, Figura 12 a).
- Beta: Os motores na configuração beta utilizam apenas um cilindro, desempenhando tanto as funções de compressão quanto as de expansão do fluido no mesmo volume de controle. A movimentação do fluido entre os trocadores de calor é realizada por um componente chamado deslocador, que ocupa o volume do gás em um espaço específico, forçando-o a se deslocar para a posição determinada pelo deslocador, Figura 12 b). Além de estar entre os trocadores de calor, como nos motores na configuração alfa, o regenerador também pode substituir o deslocador, conferindo-lhe uma dupla função. Nessa configuração, o pistão de potência e o deslocador são montados no mesmo cilindro.
- Gamma: Similar à configuração beta, a configuração gamma também utiliza um pistão de potência e um deslocador, mas a diferença principal está no fato de eles serem montados em cilindros separados, Figura 12 c).

#### 2.2.6.2 MOTORES STIRLING DINÂMICOS

Os Motores Stirling Dinâmicos representam uma categoria mais moderna, caracterizada pela ausência de mecanismos de acionamento. Essa característica proporciona benefícios como longa vida útil e alta eficiência. Esses motores se dividem em três tipos principais: (Free Piston

Stirling Engine) FPSE ou motores Stirling de pistão livre, motores Stirling fluidyne e motores Stirling termoacústicos.

- **Pistão Livre (FPSE)** : Os motores de pistão livre distinguem-se pela ausência de conexões mecânicas entre seus componentes internos e o meio externo. A transferência de energia em forma de trabalho para fora do motor pode ser realizada por meio de um gerador axial. Esses motores substituem as conexões mecânicas por um sistema de molas, resultando na necessidade de apenas duas partes móveis. Além disso, devido a hermeticidade do equipamento é possível, evitar problemas associados a ajustes. Esses motores são reconhecidos por sua estrutura simples e alta confiabilidade, o que os torna benéficos em diversas aplicações (LOVEGROVE; STEIN, 2012).
- **Motores Stirling Fluidyne**: Uma variante dos FPSEs, os motores Stirling fluidyne utilizam colunas de água como pistões sólidos. A estrutura inclui um tubo em forma de U em um lado atuando como deslocador enquanto a outra extremidade que é aberta para a atmosfera, funciona como pistão de potência. Essa configuração permite um movimento alternado da água, criando um ciclo que converte eficientemente a energia térmica em trabalho mecânico. O primeiro motor Fluidyne Stirling foi inventado em 1969, e esses motores oferecem benefícios como simplicidade construtiva, eficiência e confiabilidade. No entanto, assim como outras tecnologias Stirling dinâmicas, eles continuam a ser objeto de pesquisa para otimização e desenvolvimento, e ainda não se apresentam em configurações industriais de grande porte.
- **Motores Stirling Termoacústicos**: Representando a tecnologia mais recente e ainda em desenvolvimento, esses motores não possuem as peças mecânicas móveis interagindo com o volumen de controle, como os pistões de deslocamento e potência. Esses motores utilizam ondas sonoras como deslocador para gerar energia mecânica. Embora recentes, estão destacando-se por sua confiabilidade, eficiência, silêncio e baixa necessidade de manutenção (ZARE; TAVAKOLPOUR-SALEH, 2020).

## 2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE BOMBAMENTO

O desenvolvimento econômico e social contemporâneo exige o uso racional de água e energia no setor produtivo, visando a preservação ambiental e a redução de custos operacionais. A escassez crescente desses recursos eleva os custos de produção industrial e agrícola. O setor de saneamento, especialmente na produção de água potável, destaca-se pela necessidade de uma abordagem cuidadosa na gestão de água e energia.

Globalmente, os sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário consomem cerca de 3% da energia consumida em todo planeta terra. No Brasil, entre 2 e 3% do consumo elétrico,

equivalente a aproximadamente 10 bilhões de kWh/ano, são utilizados por prestadores de serviços de água e esgoto. A ineficiência desses sistemas é um desafio significativo, contribuindo para 25% do consumo mundial de energia, resultante de equipamentos obsoletos, perdas de carga e práticas operacionais inadequadas (GOMES; CARVALHO, 2012).

Recentemente, tanto as empresas de saneamento quanto os grandes irrigantes têm buscado aumentar a eficiência energética para reduzir custos operacionais. Para o enfrentamento desta pauta são necessárias pesquisas multidisciplinares nas áreas de engenharia como projetos hidráulicos, mecânicos e elétricos.

### 2.3.1 PANORAMA ENERGÉTICO DA AGROPECUÁRIA

No Brasil, o setor agropecuário representa uma parcela relativamente baixa no consumo final de energia, superando apenas os setores comercial e público, apontam os levantamentos da Empresa de Pesquisa Energética EPE (2023) na Figura 13. Apesar disso, o consumo de energia nesse setor mostra uma taxa média anual de crescimento superior à do PIB em ambos os cenários analisados. Apesar de apresentar crescimento significativos, a participação relativa do setor agropecuário no consumo final permanece em torno de 4% ao longo do horizonte de estudo.

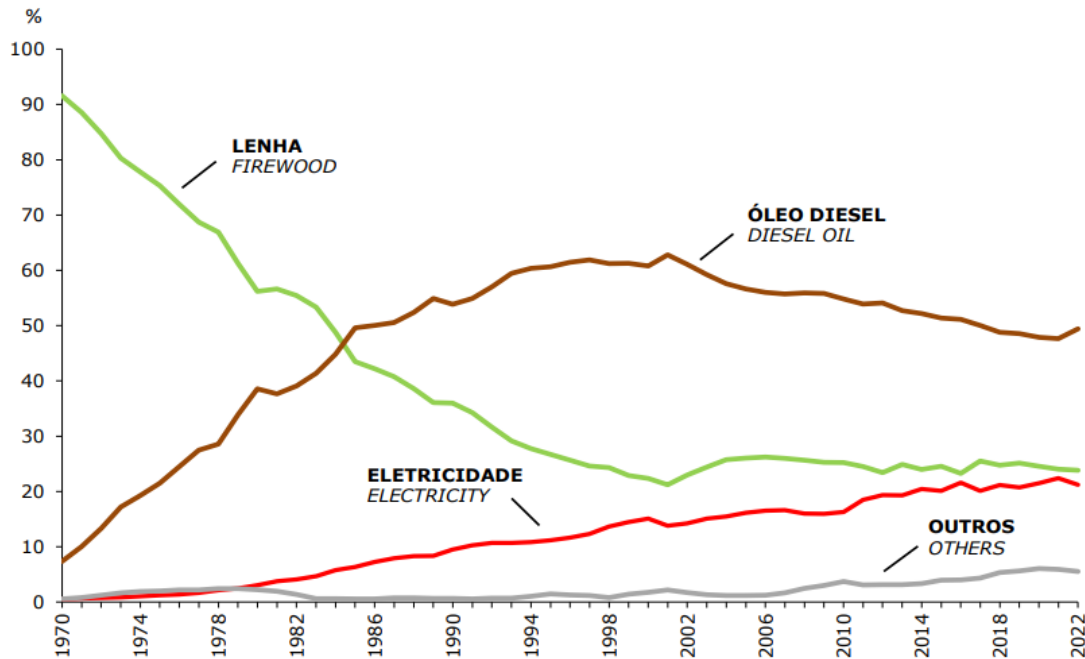
Figura 13 – Setor Agropecuário.

											%
FONTES	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	SOURCES
LENHA	24,9	24,0	24,6	23,3	25,5	24,7	25,1	24,6	24,0	23,8	FIREWOOD
ÓLEO DIESEL	52,7	52,2	51,4	51,1	50,0	48,8	48,6	47,9	47,7	49,4	DIESEL OIL
ELETRICIDADE	19,3	20,5	20,1	21,6	20,1	21,2	20,7	21,5	22,4	21,2	ELECTRICITY
OUTRAS	3,2	3,3	3,9	4,0	4,4	5,3	5,6	6,0	5,9	5,5	OTHERS
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	TOTAL

Fonte: Empresa de Pesquisa Elétrica (EPE, 2023).

A demanda de energia nesse setor concentra-se principalmente em óleo diesel, eletricidade e lenha, enquanto outros energéticos têm participação insignificante e mostram pouca expansão ao longo do tempo como ilustra a Figura 14. O aumento da área plantada de grãos, a mecanização das lavouras e os sistemas intensivos de produção geram acréscimos no consumo de diesel. Embora se divida em diversas aplicações dentro da demanda, a principal é a irrigação e transporte de água.

Figura 14 – Estrutura do Consumo no Setor Agropecuário.



Fonte: Empresa de Pesquisa Elétrica (EPE, 2023).

### 2.3.2 PANORAMA ENERGÉTICO NOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTO

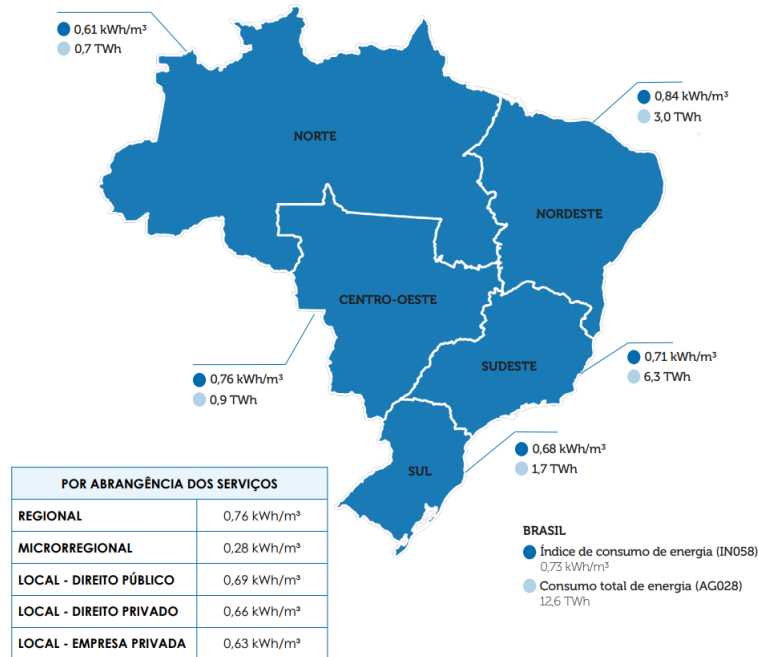
O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - Água e esgoto (SNIS-AE) em 2021 apresentou o índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (IN058) como  $0,73 \text{ kWh/m}^3$ . O consumo total em sistemas de abastecimento de água é de  $12,6 \text{ TWh}$ , correspondendo a  $88,7\%$  dos  $14,2 \text{ TWh}$  utilizados pelos serviços de água e esgoto na amostra. As unidades dimensionais *Kilowatt (kW)* e *terawatt (TW)* são unidades de potência elétrica que correspondem, respectivamente, a mil e um trilhão de watts. O indicador *h* representa o período contínuo de tempo de utilização, ou seja, durante uma hora (EPE, 2023).

O relatório anual "Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento", em sua versão mais atual publicada em dezembro de 2022 apresenta uma visão geral sobre os anos de referência 2021-2022. Informa que o consumo de energia elétrica nos sistemas de água apresenta um aumento de cerca de  $2,0\%$  em relação a 2020. A energia elétrica destaca-se como um dos principais custos operacionais dos serviços de água e esgoto. O SNIS-AE identifica um crescimento constante das despesas. Em 2021, as despesas com energia elétrica dos prestadores dos serviços de água e esgoto alcançam R\$ 9,0 bilhões, crescimento de  $21,9\%$  em relação aos R\$ 7,4 bilhões de 2020. A Figura 15 resume bem o tópico "Consumo de energia nos sistemas de abastecimento de água" do relatório (SNIS-AE, 2022).

Figura 15 – Consumo de energia nos sistemas de abastecimento de água.

### CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA\*

(kWh/m<sup>3</sup> e TWh por macrorregião geográfica, em 2021)



Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - Água e esgoto SNIS-AE (2022).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu numa pesquisa de dados climáticos da cidade de Jequié no estado da Bahia, seguido pela montagem de um protótipo composto por um motor Stirling e lente fresnel, para a coleta de dados através de ensaios experimentais. Estes dados foram implementados nas equações termodinâmicas descritas na Seção 2 e processados através das análises teóricas adiabática ideal e de Schmidt.

#### 3.1 DADOS CLIMÁTICOS DE JEQUIÉ-BA

Com base na literatura, o rendimento térmico de um motor *Stirling* é relacionado com as diferenças de temperatura entre as fontes, quente, aquecido pela radiação solar concentrada em um coletor solar, e fria, arrefecida pela temperatura ambiente. Os valores de irradiação solar e temperatura ambiente foram alvo de pesquisa.

O dimensionamento e pesquisa de contornos para um projeto heliotérmico, se aproxima muito da metodologia aplicada para os sistemas solares fotovoltaicos, consiste em uma coleta de dados sobre irradiação e temperaturas ambientes, através de bancos de dados mantidos por órgãos públicos e alimentados continuamente, afim de fornecer um suporte preciso nos projetos de energia solar.

Os dados sobre irradiação foram obtidos através do sistema *SunData*, dispostos na Tabela 2. E plotados no gráfico da Figura 16, fornecido pelo próprio sistema (BRITO, 2008).

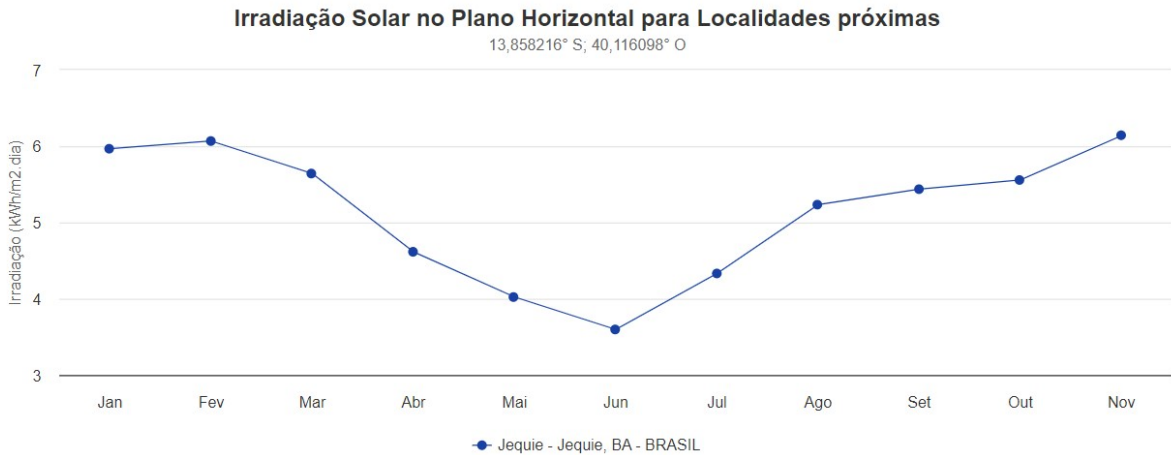
Tabela 2 – Média da irradiação solar no plano horizontal no ano 2022 em Jequié-BA.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
5,97	6,07	5,64	4,62	4,02	3,6	3,8	4,33	5,23	5,44	5,56	6,14	5,03	2,54

Fonte: CRESESB (2023).

Os resultados obtidos para temperaturas ambientes médias e máximas ao decorrer do ano de 2022 na cidade de Jequié estão dispostos na Figura 17 a) e b) respectivamente. A consulta destes dados foi realizada através do programa Agritempo 2.0 (BAMBINI et al., 2015). As temperaturas máximas correspondentes aos 12 meses do ano de 2022:

Figura 16 – Média da irradiação solar no plano horizontal no ano 2022 em Jequié-BA.



Fonte: CRESESB (2023).

Figura 17 – Temperaturas no ano 2022.

Ano	Mês	Temperatura Média (°C) - Média
2022	1	25,60
2022	2	26,01
2022	3	25,12
2022	4	24,98
2022	5	24,42
2022	6	22,91
2022	7	22,48
2022	8	21,45
2022	9	22,70
2022	10	25,36
2022	11	25,01
2022	12	25,97

a)

Temperaturas médias no ano 2022.

Ano	Mês	Temperatura Máxima (°C) - Máxima
2022	1	31,10
2022	2	31,17
2022	3	30,36
2022	4	32,60
2022	5	30,26
2022	6	28,13
2022	7	28,81
2022	8	27,21
2022	9	28,71
2022	10	30,69
2022	11	30,69
2022	12	30,48

b)

Temperaturas máximas no ano 2022.

Fonte: Agritempo(2022).

Levando em conta o que foi proposto para este trabalho, a temperatura ambiente atua como arrefecimento para o volume de controle a ser resfriado, e a irradiação concentrada atua como fonte. Os dados coletados apresentam uma boa perspectiva para o aproveitamento do potencial heliotérmico, apresentando índices ótimos de irradiação, mantendo valores acima de 4 kWh/m<sup>2</sup>.dia em 11 dos 12 meses do ano, para o período analisado. Assim como as temperaturas ambientes apresentam máximas em torno dos 30°C, condições favoráveis ao experimento.

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento prático deste estudo baseia-se na montagem de um protótipo de sistema utilizando um motor Stirling heliotérmico com concentrador solar do tipo lente fresnel, para coleta de dados. A escolha dos componentes e materiais da montagem foram etapa importante para o desenvolvimento da pesquisa.

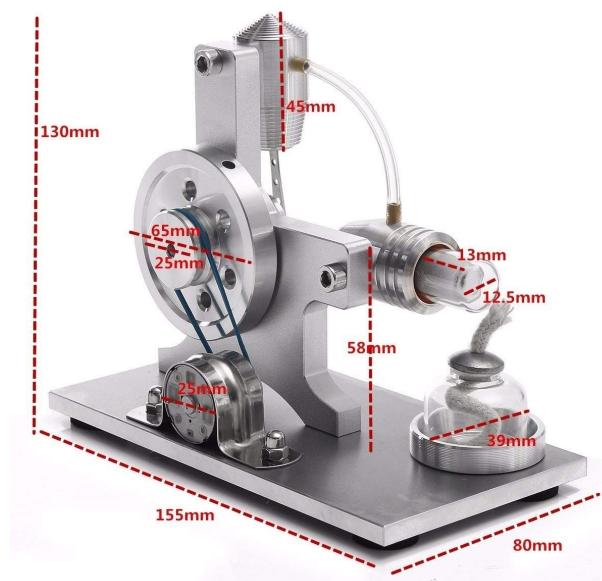
A execução do sistema consistiu na montagem a partir de itens comerciais e não dependeu da fabricação própria destes.

### 3.2.1 MOTOR STIRLING

Para escolha do motor Stirling, alguns parâmetros foram levados em consideração como disposição dos pistões, abordado na Seção 2.2.6, materiais de fabricação, complexidade da manutenção e montagem, e custo.

O modelo preterido apresenta a configuração Alfa, devido a sua construção e disposição dos êmbolos dos volumes de controle, visando ao decorrer do trabalho as manutenções e ajustes assim como o arrefecimento do embolo frio como parte dos testes propostos. Encontrou-se um modelo com materiais de construção favoráveis ao intuito do projeto, tendo os cilindros do motor fabricado em aço inoxidável (sem maiores especificações de liga fornecidas pelo fabricante) devido robustez mecânica e resistência as temperaturas que o foco solar concentrado o submeterá. Os demais componentes metálicos que são parte da estrutura de sustentação são feitos em liga de alumínio (sem maiores especificações de liga fornecidas pelo fabricante), interessante por conferir um menor peso final. A Figura 18 apresenta o modelo optado e suas dimensões.

Figura 18 – Motor Stirling educacional tipo alfa.



Fonte: Autor(2023).

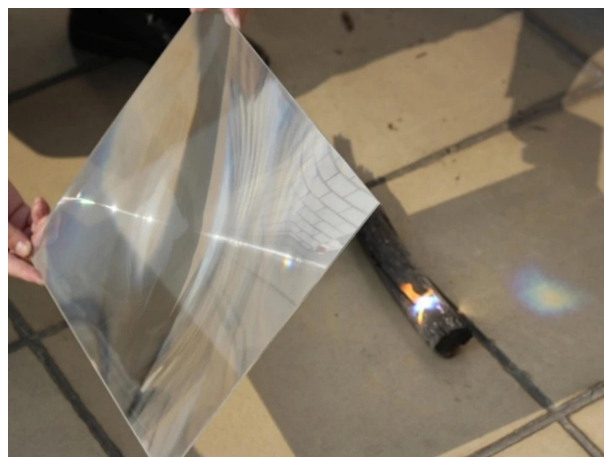
Originalmente embolo onde o deslocador atua era constituído de vidro temperado específico para altas temperaturas, sendo vantajoso por ser peça de fácil reposição e ajuste, facilmente removível. Embora os materiais originais sejam próprios para os testes pretendidos em relação a temperatura, o embolo de vidro apresentou problemas quanto a retenção do foco solar por ser transparente, o que inicialmente foi remediado pintando-o com spray preto resistente a alta temperatura, o que se mostrou ineficiente. A solução encontrada foi substituí-lo por um embolo de mesmas dimensões de material metálico.

### 3.2.2 COLETOR FRESNEL E FIXADORES

Dentre os modelos de coletores solar empregados em tecnologias heliotérmicas como disposto na Seção 2.1.2.5, optou-se por utilizar o coletor de lente fresnel, Figura 19, devido a simplicidade, confiabilidade e segurança que esta confere ao projeto, tornando fácil a fixação em relação ao protótipo. O foco solar quando concentrado torna-se visível, possuindo luminosidade análoga a uma poça de fusão dos processos de soldagem, o que torna ágil configuração do foco no receptor do motor Stirling, e seguro ao operador quanto aos riscos de queimadura. Essas características possibilitam tanto a execução dos testes sem a necessidade de rastreamento solar por dispositivos externos, quanto a fácil expansividade para estes sistemas.

Para os testes experimentais, foram acoplados utilizando cliques de papel, hastes telescópicas à lente fresnel visando a manobrabilidade durante o ajuste do foco, e permanência na posição configurada, sendo resistentes a ação do vento e vibração do motor.

Figura 19 – Concentrador solar tipo lente fresnel.



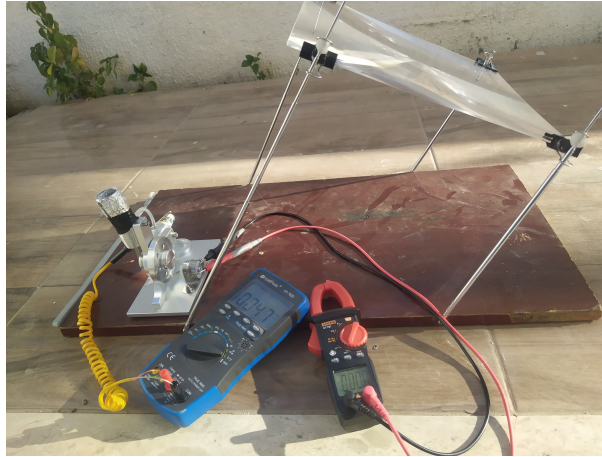
Fonte: Autor (2023).

### 3.2.3 MONTAGEM

Após selecionados os materiais e componentes, que foram dimensionados a partir da definição do motor Stirling, foi possível realizar a montagem do sistema para concentrar o foco solar no pistão quente do motor Stirling. Foi utilizada uma base de madeira retangular

40cm x 75cm para fixação das hastes telescópicas de ajuste e sustentação da lente fresnel coletora, entre elas posiciona-se o motor stirling e os equipamentos utilizados coleta de dados, ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Configuração da montagem para coleta de dados.



Fonte: Autor (2023).

### 3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para coleta dos dados, foram utilizados: sensor de temperatura infravermelho modelo HG01-V2 da marca *Hi8us*, para mensurar a temperatura no pistão de compressão, fonte fria; multímetro digital modelo Hp-760d da marca *Holdpeak*, através de ponteira termopar, para medir as temperaturas sobre o pistão de expansão, fonte quente; multímetro digital do modelo *ANENG-ST181*, para medir a tensão gerada. A configuração dos procedimentos experimentais estão dispostas nas Figuras 21, para ensaio com combustível e 22, para ensaio com concentrador fresnel. Foram realizados os seguintes ensaios:

1. Ensaio com combustível álcool 70%;
2. Ensaio com Concentrador de Lente Fresnel;
3. Utilização da água bombeada para arrefecimento do pistão de compressão;

Os procedimentos de coleta de dados para a análise do protótipo, consistiu em ensaios de funcionamento com diferentes configurações. Nestes experimentos foram analisadas as propriedades de temperatura (quente e fria) e tensão no gerador DC a vazio. Todos os testes tiveram a duração de três minutos, com tomada de dados a cada quinze segundos. A implementação destes procedimentos, visou obter uma compreensão abrangente do desempenho do motor Stirling, a partir da coleta dos dados necessários para avaliar a eficiência teórica através da Equação 2, e a viabilidade prática dessa tecnologia.

Figura 21 – Ensaio com combustível alcool 70%.



Fonte: Autor(2023).

Figura 22 – Ensaio com concentrador solar lente fresnel.



Fonte: Autor(2023).

Antes de iniciar a coleta de dados foi necessário dar a partida no motor, este processo é inicializado ao expor o pistão de expansão à fonte de calor, assim que a temperatura atinge por volta de 180°C gira-se manualmente o volante do motor para romper a inércia e iniciar o ciclo de funcionamento, após isso um intervalo de tempo de dois minutos é necessário para começar os experimentos, afim de estabilizar as temperaturas e assegurar o pleno funcionamento do motor. A temperatura ambiente no momento da coleta de dados no Município de Jequié foi de 35°C.

Para estimar a potência elétrica média gerada em cada ensaio, multiplica-se os valores de tensão média ( $E$ ) e corrente média ( $i$ ), segundo a formulação:

$$Potencia = i \times E \quad (27)$$

### 3.4 ANÁLISES TEÓRICAS

O processamento dos dados experimentais foi realizado utilizando análises teóricas importantes no estudo dos motores Stirling, a análise adiabática ideal como descreve Hirata 1997, e a análise de Schmidt como fizeram em seus estudos Rodrigues (2017) e Santos (2019).

A implementação destas abordagens resulta em uma coleta completa de resultados. A

análise adiabática ideal retorna valores de trabalho, variação da energia interna  $\Delta U$ , calor  $\Delta Q$ , números de mols  $n$ , dados da variação de pressão e dos volumes de controle. A análise isotérmica de Schmidt visa retornar as potências relativas a expansão e compressão, potência líquida produzida, e o diagrama PV.

Estas análises teóricas são realizadas baseadas em cálculos específicos das ciências térmicas, realizados a partir do fornecimento de parâmetros de entrada obtidos da literatura, medidas físicas e informações dos fabricantes ou projeto. Os cálculos são implementados por algoritmos, dispostos no apêndice A, através do *software MATLAB*, enquanto o processamento e gerenciamento dos dados foi feito através de planilhas no *software Excel*.

### 3.4.1 ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL

Considerando a fundamentação sobre as máquinas Stirling, é viável obter estimativas teóricas relacionadas à eficiência, utilizando a curva adiabática ideal para esse ciclo. Nesta análise, busca-se obter uma estimativa das especificações e comportamento do ciclo, levando em consideração as dimensões do equipamento empregado. A Figura 8 resume os estágios do ciclo Stirling ideal, servindo como base para a análise em questão. A Tabela 3 faz um resumo dos procedimentos e considerações feitas para se obter a eficiência do motor estudado, além dos dados de trabalho calor e variação de energia interna para cada um dos 4 estágios do ciclo, considerando condições de contorno ideais.

Tabela 3 – Análise adiabática ideal.

Estágio do Ciclo	Trabalho $W$ (J)	Variação da energia interna $\Delta U$ (J)	Calor $Q$ (J)
1-2	$nRT \ln(V_f/V_i)$	$\Delta U$ nulo, devido a temperatura constante	$\Delta U + W$
2-3	Trabalho nulo, devido ao volume constante	$nC_v(T_f - T_i)$	$\Delta U + W$
3-4	$nRT \ln(V_f/V_i)$	$\Delta U$ nulo, devido a temperatura constante	$\Delta U + W$
4-1	Trabalho nulo, devido ao volume constante	$nC_v(T_f - T_i)$	$\Delta U + W$
<b>Valores Líquidos</b>	<b>Somatório dos trabalhos de cada estágio</b>	<b>Somatório das variações de cada estágio</b>	<b>Somatório do Calor de cada estágio</b>
<b>Calor total de entrada</b>			<b>Entrada no Estágio 1-2</b>
<b>Eficiência(<math>\epsilon</math>) = <math>\frac{ W_{liq} }{Q_{in}}</math></b>			<b>Razão do Módulo do trabalho e o calor de entrada</b>

Fonte: Autor(2023).

Por conta das unidades de medida utilizadas, o valor de  $R$ , para atingir a análise dimensional correta foi de:

$$R = 0,0820574587L \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$$

A substituição de valores na Tabela 3, e operação com os coeficientes são detalhados no Anexo B.

### 3.4.2 ANÁLISE DE SCHMIDT

É importante ressaltar que, por ser uma análise teórica, são feitas considerações para um ciclo ideal. Na prática, o desempenho do motor geralmente fica abaixo de 60% do desempenho previsto pela teoria de Schmidt. No entanto, essa abordagem é mais realista do que o ciclo de Stirling ideal. O desempenho do motor pode ser calculado usando um diagrama P-V (pressão x volume), sendo o volume do motor determinado pelas dimensões internas dos cilindros, enquanto a massa do gás de trabalho e a temperatura são obtidas a partir da literatura e medidas experimentais (SANTOS, 2019).

Como descrevem em suas metodologias Hirata (1997) e (URIELI; BERCHOWITZ, 1984 apud SANTOS, 2019), condições de contorno devem ser consideradas na análise isotérmica ideal de Schmidt, lista-se:

1. O fluido de trabalho é considerado um gás ideal;
2. O fluido de trabalho mantém a massa constante;
3. A pressão instantânea é a mesma em todo o sistema;
4. Os processos de expansão e compressão são isotérmicos;
5. O volume morto de expansão mantém a temperatura do cilindro de expansão  $T_e$ , o volume morto de compressão mantém a temperatura do cilindro de compressão  $T_c$  durante o ciclo;
6. O processo de regeneração é perfeito, admite-se o valor de 100% de eficiência;
7. A temperatura do fluido de trabalho do regenerador é uma média da temperatura de expansão  $T_e$  e compressão  $T_c$ ;
8. Não há perda de carga nos trocadores;
9. A variação dos volumes de expansão  $V_e$  e de compressão  $V_c$  é senoidal;
10. Considera-se constante a velocidade de rotação.

### 3.4.2.1 ALGORITMO PARA ANÁLISE DE SCHMIDT

Para simular o funcionamento de um motor Stirling, é necessário aplicar as equações desse modelo em um algoritmo, Anexo A, destinado à implementação em um software de cálculo numérico, neste estudo utilizou-se *MATLAB*.

Os dados de entrada no algoritmo para a simulação do motor Stirling através do modelo isotérmico ideal de Schmidt são:

Constante dos gases ideais ( $R$ ).

Parâmetros geométricos do motor:

- $V_h$ : Volume do aquecedor,
- $V_f$ : Volume do resfriador,
- $V_{swc}$ : Volume varrido no espaço de compressão,
- $V_{swe}$ : Volume varrido no espaço de expansão,
- $V_{clc}$ : Volume morto do espaço de compressão,
- $V_{cle}$ : Volume morto do espaço de expansão,
- $\alpha$ : Ângulo de fase.

Parâmetros operacionais:

- $P_{med}$ : Pressão média de operação,
- $T_h$ : Temperatura do aquecedor,
- $T_f$ : Temperatura do resfriador,
- $N$ : Velocidade de rotação.

Os dados de saída como resultado da simulação são:

- Trabalho de expansão  $W_e$ , trabalho de compressão  $W_c$  e trabalho líquido  $W_m$ , Equações 20, 22 e 23. Todos os valores são convertidos para potência através da Equação 26;
- Eficiência térmica do motor  $\eta_m$ , Equação 25;
- Diagrama Pressão-Volume (P-V) para o ciclo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro teste realizado foi conferir a temperatura do foco solar sobre o êmbolo do cilindro de expansão, chegando a mais de  $1000^{\circ}\text{C}$ , como ilustra a Figura 23. Embora a temperatura concentrada pela lente fresnel atinja valores muito altos, pelas condições operacionais como vento e instabilidades no concentrador, assim como as próprias características de transferência de calor do material do receptor a temperatura do cilindro de expansão nos pontos onde não estão diretamente expostos ao foco são expressivamente menores, mas ainda oferecem condições de operação. Os dados de temperatura de aquecimento do volume de controle de expansão foi medida fora do foco solar, no material metálico do embolo, visando coletar a real temperatura a que este está submetido.

Figura 23 – Temperatura foco Solar.



Fonte: Autor (2023).

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados no dia 28 de Novembro de 2022, no laboratório de máquinas e equipamentos do IFBA campus Jequié, Bahia. É relevante citar que os testes com o foco solar foram realizados no intervalo de horário do dia que fornece melhor incidência de irradiação no plano horizontal, entre as 11:00 e 13:00 horas. Para todas as análises obtiveram-se valores mínimos, máximos e médios assim como os tratamentos estatísticos de desvio padrão e erro padrão médio, para os parâmetros de tensão elétrica (V), temperatura baixa ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_l$ , e temperatura alta ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_h$ .

Os parâmetros de corrente (A) e potência elétrica (Watts), foram dispostos e calculados separadamente das tabelas.

Os resultados de potência elétrica produzida pelo conjunto motor e gerador, foram calculados a partir da Equação 27 os indicadores de rendimento térmico calculados pela Equação 24.

#### 4.1.1 ENSAIO COM COMBUSTÍVEL

Tabela 4 – Dados para combustível alcool 70%.

Tempo	Tensão Elétrica (V)	Temperatura Baixa (°C)	Temperatura Alta (°C)
0:00:00	2,710	34,0	286
0:00:15	2,515	32,2	279
0:00:30	2,330	31,6	272
0:00:45	2,568	33,5	267
0:01:00	2,677	33,0	265
0:01:15	2,830	32,0	265
0:01:30	2,865	32,9	266
0:01:45	2,850	32,9	269
0:02:00	2,902	32,9	271
0:02:15	2,949	32,4	273
0:02:30	2,915	32,1	282
0:02:45	2,917	33,6	287
0:03:00	2,894	33,5	287

Fonte: Autor(2023).

Devido a quantidade de aparelhos de medição disponíveis, os ensaios para coleta dos dados de corrente elétrica, foram feitos de maneira complementar, mantidas as mesmas condições de contorno foi encontrado um valor médio de  $27 \pm 1\% mA$ .

Tabela 5 – Resultados estatísticos obtidos a partir dos dados da Tabela 4.

	Tensão Elétrica (V)	Temperatura Baixa (°C)	Temperatura Alta (°C)
Amostragem	13	13	13
Valor Mínimo	2,330	31,6	265
Valor Máximo	2,949	34,0	287
Valor médio	2,763	32,8	274,5384615
Desvio padrão	0,1909586141	0,7197756061	8,569474747
Erro padrão da média	0,01468912416	0,05536735431	0,6591903651
Resultado	$2,763 \pm 0,015$	$32,80 \pm 0,06$	$274,5 \pm 0,7$

Fonte: Autor(2023).

A partir destes dados experimentais calculam-se:

- Potencia elétrica gerada: 0,07460 *Watts*;
- Rendimento térmico: 44,13%.

#### 4.1.2 ENSAIO HELIOTÉRMICO

Tabela 6 – Dados para concentrador lente fresnel.

Tempo	Tensão Elétrica (V)	Temperatura Baixa (°C)	Temperatura Alta (°C)
0:00:00	3,200	43,4	382
0:00:15	3,323	41,2	367
0:00:30	3,633	41,6	417
0:00:45	3,615	42,9	406
0:01:00	3,627	43,8	422
0:01:15	3,615	43,5	428
0:01:30	3,258	42,2	408
0:01:45	3,382	41,2	406
0:02:00	2,935	42,0	388
0:02:15	3,403	41,2	411
0:02:30	3,422	42,0	398
0:02:45	3,431	43,0	402
0:03:00	3,296	40,0	406

Fonte: Autor(2023).

Assim como os dados apresentados anteriores, de maneira complementar foram realizadas coletas de dados para corrente elétrica, resguardando as mesmas condições operacionais, foi encontrado um valor médio de  $32 \pm 1\% mA$ .

Tabela 7 – Resultados estatísticos obtidos a partir dos dados da Tabela 6.

	Tensão Elétrica (V)	Temperatura Baixa (°C)	Temperatura Alta (°C)
Amostragem	13	13	13
Valor Mínimo	2,935	40,0	367
Valor Máximo	3,633	43,8	428
Valor médio	3,395	42,2	403,1538462
Desvio padrão	0,2026703146	1,120725498	16,54713547
Erro padrão da média	0,0155900242	0,08620965366	1,272856575
Resultado	$3,395 \pm 0,016$	$42,2 \pm 0,09$	$403 \pm 1,3$

Fonte: Autor(2023).

A partir destes dados experimentais calculam-se:

- Potencia elétrica gerada: 0,1086 *Watts*;
- Rendimento térmico: 53,38%.

### 4.1.3 ENSAIO HELIOTÉRMICO RESFRIADO

Tabela 8 – Dados para concentrador lente fresnel.

Tempo	Tensão Elétrica (V)	Temperatura Baixa (°C)	Temperatura Alta (°C)
0:00:00	4,006	31,2	388
0:00:15	3,398	32,2	377
0:00:30	3,498	31,5	407
0:00:45	4,086	32,8	416
0:01:00	4,335	32,3	420
0:01:15	4,464	32,0	418
0:01:30	4,416	32,5	405
0:01:45	4,314	32,4	401
0:02:00	4,280	32,6	396
0:02:15	4,332	32,8	406
0:02:30	3,964	33,4	399
0:02:45	4,017	34,6	407
0:03:00	3,972	34,1	401

Fonte: Autor(2023).

A disposição de aparelhos de medição limitou os ensaios de corrente elétrica de ocorrer simultaneamente aos demais. A partir de teste adicionais preservadas as mesmas condições de contorno foi encontrado um valor médio de  $38 \pm 1\% mA$ .

Tabela 9 – Dados para concentrador lente fresnel.

	Tensão Elétrica (V)	Temperatura Baixa (°C)	Temperatura Alta (°C)
Amostragem	13	13	13
Valor Mínimo	3,398	31,2	377
Valor Máximo	4,464	34,6	420
Valor médio	4,083	32,6	403,1538462
Desvio padrão	0,3318514981	0,9474662568	11,9083035
Erro padrão da média	0,02552703831	0,07288201975	0,9160233463
Resultado	$3,395 \pm 0,025$	$42,2 \pm 0,07$	$403 \pm 0,92$

Fonte: Autor(2023).

A partir destes dados experimentais calculam-se:

- Potencia elétrica gerada: 0,1552 *Watts*;
- Rendimento térmico: 54,78%.

## 4.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES TEÓRICAS

### 4.2.1 EFICIÊNCIA, TRABALHO E CALOR DE ACORDO A ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL

Na Seção 3.4.1 é apresentado o memorial de cálculo para a obtenção da eficiência ( $\epsilon$ ), trabalho ( $W$ ) e calor ( $Q$ ) considerando uma curva P–V ideal para o ciclo *Stirling*, conforme a Figura 8. As especificações da geometria da máquina estudada, servem como base para obtenção dos volumes de expansão e compressão que norteiam essa análise. A Tabela 10 apresenta os valores de entrada para obtenção dos demais parâmetros da geometria.

Tabela 10 – Dimensões do Motor.

Dimensão	Valor	Comentário
Diâmetro interno, $d$	12,5 mm	$d_h = d_l$ , assumindo diâmetros internos iguais para os cilindros
Deslocamento, $s$	13 mm	Deslocamento linear medido no motor
Área, $A$	245,437 mm <sup>2</sup>	Área da seção transversal, obtida a partir do diâmetro

Fonte: Autor(2023).

Com essas especificações foi possível calcular os volumes utilizando as Equações 3, 4 e 5, conforme resultado apresentado na Tabela 11:

Tabela 11 – Volumes de Controle.

V	Volume (mm <sup>3</sup> )	Volume (L)
$V_3 - V_1$	3190,680039	0,003191
$V_1$	2617,993878	0,002618
$V_3$	5808,673917	0,005809

Fonte: Autor(2023).

Uma vez de posse dos volumes, é possível executar o procedimento da Tabela 1 e obter todas as variáveis de estado do processo, gerando uma Tabela 12 com os resultados.

Tabela 12 – Resultado das variáveis de estado para análise adiabática ideal.

Variáveis	1	2	3	4
n (mol)	0,0002245	0,0002245	0,0002245	0,0002245
V (L)	0,0026180	0,0058087	0,0058087	0,0026180
T (K)	676,3038462	676,3038462	315,3038462	315,3038462
P (atm)	4,7590576	2,1449274	1,0000000	2,2187500

Fonte: Autor(2023).

Com as variáveis de estado definidas, foi aplicado os dados para o cálculo na Tabela 3, obtendo como resultado a Tabela 13:

Tabela 13 – Resultado da Análise Adiabática.

Estágio do Ciclo	Trabalho (J)	Energia interna $\Delta U (J)$	Calor (J)
1-2	1,0055423	0,0000000	1,0055423
2-3	0,0000000	-1,6837511	-1,6837511
3-4	-0,4688002	0,0000000	-0,4688002
4-1	0,0000000	1,6837511	1,6837511
<b>Valores Líquidos</b>	0,5367421	0,0000000	0,5367421
<b>Calor de entrada</b>			1,0055423
<b>Eficiencia</b>			0,5337837

Fonte: Autor(2023).

O implica em uma eficiência teórica:

$$\varepsilon = 53,38\%$$

Levando em conta que os dados de temperatura considerados nessa análise, foram os obtidos no ensaio utilizando a lente fresnel como fonte de calor.

## 4.2.2 ANÁLISE DE SCHIMDT

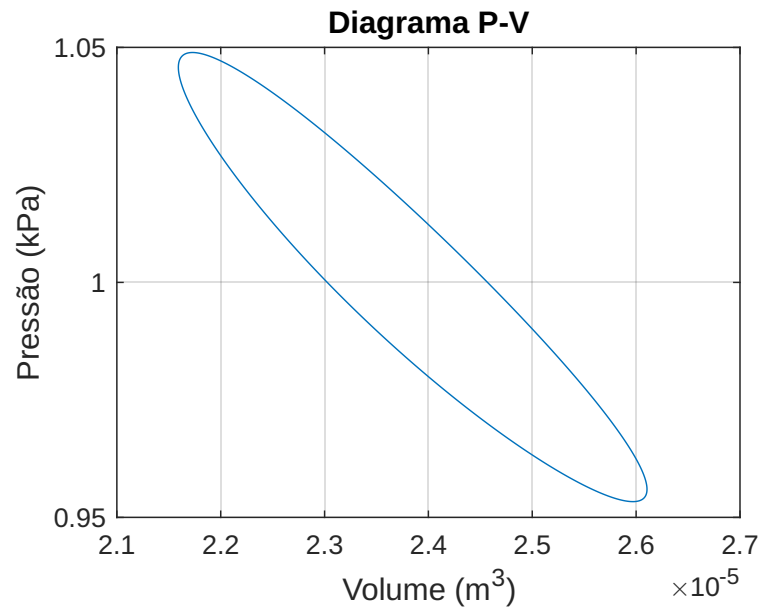
Realizou-se uma análise do motor Stirling através de um modelo baseado na análise isotérmica de Schmidt, conforme o algoritmo compilado no MATLAB, que tem por saída um diagrama P-V detalhando o trabalho líquido assim como os dados de trabalho em compressão e expansão, calculou-se também através do algoritmo o rendimento teórico de uma máquina térmica.

### 4.2.2.1 DIAGRAMA P-V

O gráfico do diagrama P-V foi gerado a partir do algoritmo da análise de Schmidt, descrito na Seção 3.4.2.1 e apresenta diferenças em relação ao gráfico do ciclo Stirling ideal mostrado na Figura 8. Isso ocorre devido às variações senoidais nos volumes consideradas por Schmidt, conferindo ao ciclo uma forma quase elíptica.

A área sob o diagrama P-V representa o trabalho líquido do ciclo. Essas informações destacam a importância da otimização das variáveis de projeto para maximizar o desempenho do motor Stirling.

Figura 24 – Diagrama P-V.



Fonte: Autor (2023).

#### 4.2.2.2 POTÊNCIA TEÓRICA ESTIMADA

Com base na análise isotérmica de Schmidt, os dados de saída do algoritmo foram os seguintes:

- Potência de expansão: 0.5423 W
- Potência de compressão: -0.2528 W
- Potência líquida: 0.2895 W
- Rendimento de Carnot: 53.38%

Esses resultados indicam que a potência de expansão gerada durante o ciclo isotérmico de Schmidt, positiva, é maior que a potência de compressão, negativa, o valor absoluto da diferença entre elas resulta numa potência líquida do ciclo. Além disso, o rendimento de Carnot, uma medida da eficiência térmica, é apresentado como 53.38%.

A partir desta análise, é possível observar como as condições operacionais influenciam no rendimento e na potência do motor, assim como as dimensões geométricas dos cilindros e dos pistões. Evidencia-se a partir dos rendimentos que a quantidade de calor transferida para o gás, incrementada ao elevar a temperatura da fonte quente, e o arrefecimento do cilindro de compressão incrementado ao manter-se constante a troca de calor atenuando e controlando a escalada da temperatura, influenciam diretamente na potencia estimada.

### 4.3 DADOS TEÓRICOS X DADOS EXPERIMENTAIS

A seguinte tabela apresenta os dados de saída das análises teóricas, assim como os valores calculados através dos dados experimentais:

Tabela 14 – Comparação dos resultados.

Resultados	Análise de Schimdt	Análise Adiabática Ideal	Ensaio experimental
Potencia Gerada (W)	0,2895	-	0,1086
Rendimento Térmico (%)	53,38	53,38	53,38

Fonte: Autor(2023).

A comparação entre os resultados experimentais e teóricos se mostraram interessantes quanto a fidelidade da simulação comparado aos resultados reais. Para esta comparação e para alimentar o algoritmo para o teste de Schimdt assim como a análise adiabática, foram utilizados os dados coletados dos testes experimentais do ensaio heliotérmico. Comparando os resultados, dos testes experimentais: a potência elétrica gerada foi de 0,1086 *Watts*, e o rendimento térmico: 53,38%. Enquanto os resultados de Schimdt foram: potência líquida: 0.2895 *Watts* e rendimento de Carnot: 53.38%. A análise adiabática resultou no valor de 53.38% de eficiência teórica. O rendimento de Carnot é calculado considerando um ciclo idealizado, e por não considerar perdas os resultados do algoritmo de Schmidt e experimentais são iguais pois são calculados da mesma formula, a Equação 25. É interessante observar que a análise adiabática obtém o mesmo valor, mesmo calculando por outros parâmetros, através da razão do trabalho líquido pelo calor de entrada como dispõe a Equação 11.

Visualiza-se na Tabela 14, que a potência estimada pela simulação baseada na análise de Schimdt, é substancialmente maior do que a encontrada pelos cálculos experimentais, embora ambos tenham utilizados os mesmos parâmetros de entrada, os resultados experimentais refletem toda a perda energética que o conjunto experimenta durante a operação, estas perdas são ocasionadas tanto pela transmissão do volante do motor para o eixo do gerador, quando na própria transformação de energia cinética em elétrica pelo gerador.

A análise dos resultados de potência gerada nos testes experimentais revelou que uma maior diferença entre os valores das temperaturas de aquecimento e arrefecimento está diretamente associada a uma estimativa mais precisa do rendimento teórico visto uma potência gerada mais elevada. No experimento em que a água foi empregada para resfriar o cilindro de compressão, observou-se uma diferença de temperatura mais efetiva em comparação ao teste utilizando a mesma fonte de calor, a energia solar térmica. Constatou-se que o sistema resfriado por água gerou 0,1552 *Watts*, enquanto o sistema arrefecido pela temperatura ambiente gerou 0,1086 *Watts*.

O teste conduzido com combustível resfriado pela temperatura ambiente resultou em uma geração média de 0,07460 Watts, servindo como parâmetro para avaliar o desempenho das gerações elétricas, tanto em relação ao aumento do fornecimento de calor ao substituir o combustível álcool 70 pelo foco solar concentrado pela lente fresnel quanto em relação à temperatura de resfriamento do cilindro de compressão. Neste teste, a temperatura de resfriamento pela temperatura ambiente na sombra se aproximou das temperaturas de resfriamento proporcionadas pelo resfriamento a água quando o sistema está exposto ao sol. A partir desta comparação é possível quantificar a influência desses parâmetros nas características de desempenho do sistema, o que respalda a proposta de utilização deste tipo de tecnologia com a configuração de arrefecimento utilizando água para acionamento de sistemas hidráulicos.

#### 4.3.1 PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DE MOTORES STIRLING SOLARES EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

As pesquisas sobre consumo energético em sistemas de bombeamento, indicam que o abastecimento e tratamento de água, seguidos do setor agropecuário, onde a irrigação de lavouras é protagonista, são os maiores agentes consumidores. Existe também o fato da eficiência energética destes sistemas hidráulicos agravarem substancialmente o cenário, principalmente em perdas.

Recentemente tem crescido o número de pesquisas sobre variação da matriz energética visando reduzir a dependência de combustíveis fósseis e fontes poluentes, o que estende-se para sistemas de bombeamento de água, estes estudos tem foco em fontes limpas e ambientalmente amigáveis, relacionando sistemas de bombeamento como a energia solar, o que indica uma tendência em direção à sustentabilidade e redução de impactos ambientais. À medida que a conscientização sobre as mudanças climáticas e os pactos e tratados internacionais sobre práticas mais ecoeficientes cresce, a incorporação de energias renováveis, incluindo a solar térmica avança.

A integração de tecnologias solares, como sistemas fotovoltaicos ou térmicos, nos sistemas de bombeamento de água oferece vantagens econômicas e ecológicas. A energia solar, caracteriza-se por ser uma fonte limpa e renovável gerando baixo impacto ambiental, contribuindo para a diversificação da matriz energética. Essa abordagem não apenas reduz as emissões de carbono, mas também promove a autonomia energética em áreas remotas ou fora da rede elétrica convencional.

A partir dos dados coletados nesta pesquisa e da comparação destes, observa-se a possibilidade da integração de motores Stirling solares em sistemas de acionamento de bombas, pois se destaca por ser uma tecnologia baseada em energia limpa e renovável, e que oferece altos índices de rendimento. O diferencial desta proposta é o evidente ganho de desempenho quando o sistema Stirling solar configura-se utilizando arrefecimento a água, o que para esta proposta

seria adequado, pois utilizaria a própria água bombeada que é a finalidade da aplicação para o aumento do rendimento desta. Possibilitando ganhos na eficiência energética, atrelados a uma tecnologia limpa e sustentável para o acionamento de sistemas hidráulicos.

## 5 CONCLUSÃO

Ao analisar de forma teórica e prática um sistema heliotérmico composto por motor Stirling e lente fresnel concentradora, nota-se que as estimativas teóricas baseadas na análise Schmidt e adiabática ideal mantiveram uma notável fidelidade com os resultados práticos. Os resultados e discussões conduziram à compreensão da implementação de sistemas heliotérmicos, particularmente na integração de motores Stirling e coletores solares tipo lente fresnel, para a geração de energia elétrica que pode ser utilizada no acionamento de bombas hidráulicas.

Os ensaios revelaram que o conjunto motor Stirling com lente fresnel concentradora, é capaz de gerar energia e os indicadores de potência mostraram-se relacionados com os fatores de operação, especificamente a diferença entre as temperaturas alta e baixa atuantes, os resultados apontam uma melhor produção quando o sistema se configura resfriado a água, simulando o arrefecimento por água bombeada quando aplicado o conjunto para esta finalidade, o que sustenta a proposta que motivou esse estudo.

Com base nos resultados desta pesquisa, respalda-se uma proposta sobre integração de motores Stirling solares em sistemas de acionamento de bombas, destacando-se como uma tecnologia limpa com altos índices de rendimento. Essa abordagem se apresenta vantajosa ao utilizar arrefecimento a partir da própria água bombeada pelo sistema. Embora o protótipo utilizado nos testes apresenta dimensões reduzidas, resguardada as proporções é possível reproduzir um modelo de maior potência sendo capaz de executar a proposta do estudo em sistemas de bombeamento para agricultura ou abastecimento de água.

A constatação de que a otimização do processo de arrefecimento exerce um impacto positivo no rendimento térmico reforça e fundamenta a proposta da utilização da água bombeada como fonte fria em um sistema de bombeamento acionado por um motor Stirling solar. Esses dados fornecem uma base sólida para a consideração prática dessa abordagem em aplicações reais, contribuindo assim para a busca contínua por fontes de energia mais eficientes e sustentáveis em sistemas de bombeamento de água.

## REFERÊNCIAS

- BAMBINI, M.; JUNIOR, A. L.; ROMANI, L.; OTAVIAN, A.; KOENIGKAN, L.; EVANGELISTA, S. d. M. **Manual on-line do sistema Agritempo versão 2.0**. Campinas: Embrapa informática Agropecuária, 2015., 2015.
- BRITO, S. d. S. **Centro de referência para energia solar e eólica. CRESESB Informe-Rio de Janeiro**, v. 12, n. 13, p. 3, 2008.
- EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; KADNER, S.; ZWICKEL, T.; EICKEMEIER, P.; HANSEN, G.; SCHLÖMER, S.; STECHOW, C. von et al. **Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.
- EPE, E. d. P. E. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2023: Ano base 2022**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.
- GOMES, H. P.; CARVALHO, P. d. **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2012.
- HATHAWAY, D. D. H. **Solar Science: The Interior of the Sun**. 2022. Curator: Mitzi Adams, mitzi.adams@nasa.gov; NASA Official: Dr. David McKenzie, david.e.mckenzie@nasa.gov; Last Updated: September 22, 2022. Disponível em: <<https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.
- HIRATA, K. **Schmidt theory for Stirling engines**. 1997. Disponível em: <<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. [S.l.]: 8a Edição ed. Grupo GEN, 2019.
- LANG, K.; ZIRIN, H. **Sun**. 2019. Encyclopedia Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/place/Sun>>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.
- LOVEGROVE, K.; STEIN, W. **Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications, 2012**. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de trabalho de energia solar-GTES**. [S.l.: s.n.], 2014.
- REN21. **Renewables 2023 Global Status Report Collection**. 2023. Disponível em: <<https://www.ren21.net/gsr-2023/>>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.
- RODRIGUES, N. D. R. P. **Sistema de microgeração de energia com base num motor stirling**. 2017.
- SANTOS, E. L. P. d. S. **Dimensionamento e simulação de um sistema de energia solar com concentrador parabólico e motor stirling**. [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - Escola Politécnica, 2019.

SNIS-AE, S. N. d. I. s. S. e. E. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**. 2022. Disponível em: <[https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos\\_snis](https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos_snis)>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

URIELI, I.; BERCHOWITZ, D. M. **Stirling cycle engine analysis**. [S.l.: s.n.], 1984.

ZARE, S.; TAVAKOLPOUR-SALEH, A. Free piston stirling engines: A review. **International Journal of Energy Research**, Wiley Online Library, v. 44, n. 7, p. 5039–5070, 2020.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. Recurso eletrônico. Dados eletrônicos.

## Anexos

## ANEXO A – ALGORÍTIMO ANÁLISE DE SCHMIDT

```

% Simulação de um motor Stirling pela análise isotérmica de Schmidt
% Autor: Eduardo Libório (2019) adaptado por Victor Bastos(2023)
clear; close all; clc;
%% Schmidt
fprintf('Análise isotérmica de Schmidt\n')
global P_m T_h T_k
global V_swe V_swc V_cle V_clc V_r V_h V_k
global alpha_e N
global R

%% Dados de entrada

%% Volumes

vswc = 3190.680039/10^9; %volume varrido compressão
vswe = vswc; %volume varrido compressão
phase = 90;
alpha = phase*pi/180;
theta= phase*pi/180; % Valor inicial do ângulo de manivela
vr=532/10^9;% volume do regenerador;
vk=13253.59401/10^9;% volume do resfriador;
vh=13253.59401/10^9;% volume do aquecedor;
vclc = vk-vswe; % volume morto de compressão;
vcle = vclc; %volume morto de expansão

%% Gas
% disp('gas')%
% fscanf(fid, '%c',1); % bypass the previous newline character
%gas_type = fscanf(fid, '%c',2);
gas_type = 1;
mu0 = 18.85e-6;
t_suth = 80.0;
rgas=8.3146210; cp=5.193e3; cv=3.116e3; %(J/kg*K) (Çengel, 2015)
gama = cp/cv;
t0 = 273;
prandtl = 0.71;

```

```

%% Operação
% disp('operat')%
pmean = 1; % pressão média de 1 atm
tk = 315.30;
th = 676.3038462;
freq = 25;
tr = (th - tk)/log(th/tk);
omega = 2*pi*freq;
%%
V_clc=vclc; V_swc=vswc; V_cle=vcle; V_swe=vswe; alpha_e=phase;
P_m=pmean;N=freq;R=rgas;
T_k=tk; T_r=tr; T_h=th; V_k=vk;V_r=vr;V_h=vh;
%% Temperaturas
T_c=T_k;
T_e=T_h;
T_r=(T_e-T_c)/log(T_e/T_c);
%% Variação do volume
s=(V_swc/(2*T_k))+(V_clc/(T_k))+(V_k/(T_k))+(V_r/(T_r))+(V_h/(T_h))+(V_c=1/2*((V_swe/T_h)^2)+2*(V_swe/T_h)*(V_swc/T_k)*cosd(alpha_e)+(V_swc/
b=c/s;
beta=atand((V_swe*sind(alpha_e)/T_h)/((V_swe*cosd(alpha_e)/T_h)+(V_swc/
m_g=(P_m/R)*(s*sqrt(1-b^2)); % massa de gás
k=360; % pontos
for n=1:k+1
% Volume instantâneo de compressão
V_c(n)=(V_swc/2)*(1+cosd(theta))+V_clc;
% Volume instantâneo de expansão
V_e(n)=(V_swe/2)*(1+cosd(theta+alpha_e))+V_cle;
% Volume instantâneo total
V_T(n)=V_e(n)+V_c(n)+V_r;
% Pressão instantânea
phi=theta+beta;
P(n)=(m_g*R)/(s*(1+b*cosd(phi)));%?
theta=theta+1;
end
%% trabalho realizado durante o processo
% trabalho de expansão (kJ)
W_e=P_m*V_swe*pi*sind(beta-alpha_e)*(sqrt(1-b^2)-1)/b;
% trabalho de compressão (kJ)

```

```

W_c=P_m*V_swc*pi*sind(beta)*(sqrt(1-b^2)-1)/b;
% trabalho liquido (kJ)
W_i=W_e+W_c;
% potência (kW)
Pt_e=W_e*N; % Potência de expansão
fprintf('Pt_e = %f W (Potência de expansão)\n',Pt_e*1e3)
Pt_c=W_c*N; % Potência de compressão
fprintf('Pt_c = %f W (Potência de compressão)\n',Pt_c*1e3)
Pt=W_i*N; % Potência de líquida
fprintf('Pt = %f W (Potência líquida)\n',Pt*1e3)
% Eficiência
eta=W_i/W_e;
eta_carnot=1-T_c/T_e; % Eficiência de Carnot
fprintf('eta = %4.2f %% (RENDIMENTO DE CARNOT)\n',eta*100)
%% plot
figure
plot(V_T,P);
title('Diagrama P-V')
xlabel('Volume (m^3)')
ylabel('Pressão (kPa)')
grid on

```

## ANEXO B – TABELAS ANÁLISE ADIABÁTICA IDEAL

	A	B	C	D
n	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225
V	0,002618	0,005809	0,005809	0,002618
T	676,30	676,30	315,30	315,30
P	4,76	2,14	1,00	2,22
R(L*atm/K*mol)	0,0820575	R(J/K*mol)	8,3100	
		Cv(J/kmol)	20,7750000	
INTERVALO	Trabalho (J)	Energia interna $\Delta U$ (J)	Calor (J)	
1-2	1,0055423	0,0000000	1,0055423	
2-3	0,0000000	-1,6837511	-1,6837511	
3-4	-0,4688002	0,0000000	-0,4688002	
4-1	0,0000000	1,6837511	1,6837511	
LÍQUIDO	0,5367421	0,0000000	0,5367421	
		Calor de entrada	1,0055423	
		Eficiencia	0,5337837	