

Universidade do Estado do Pará  
Campus XV - Redenção  
Centro de Ciências Sociais e Educação  
Curso de Licenciatura em Física



Gabriel da Silva Souza  
Paulo Henrique da Luz Santos

**Motor Stirling e tecnologias aplicadas à Arduino:  
Geradores e gerenciadores de tensão elétrica**

**UEPA**  
Universidade do Estado do Pará

Redenção - Pará  
2022

Gabriel da Silva Souza  
Paulo Henrique da Luz Santos

# **Motor Stirling e tecnologias aplicadas à Arduino**

## Geradores e gerenciadores de tensão elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciatura em Física, do Centro de Ciências Sociais e Educação, da Universidade do Estado do Pará.  
Orientador: Prof. Dr. Benedito Lobato

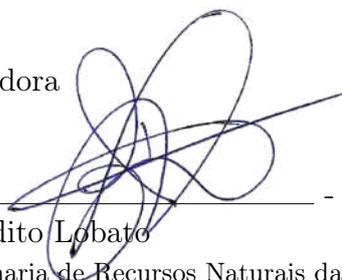
Gabriel da Silva Souza  
Paulo Henrique da Luz Santos

## Motor Stirling e tecnologias aplicadas à Arduino: Geradores e gerenciadores de tensão elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciatura em Física, do Centro de Ciências Sociais e Educação, da Universidade do Estado do Pará.

Data de aprovação: 5 / 08 / 2022

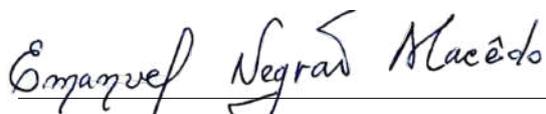
Banca Examinadora



- Orientador

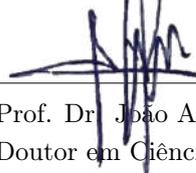
Prof. Dr. Benedito Lobato

Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - UFPA



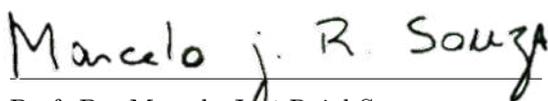
Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo

Doutor em Engenharia Mecânica - UFRJ



Prof. Dr. João Augusto Pereira Neto

Doutor em Ciências Socioambientais - UFPA



Prof. Dr. Marcelo José Raiol Souza

Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UEPA**

---

Souza, Gabriel da Silva

Motor Stirling e tecnologias aplicadas à Arduino: Geradores e gerenciadores de tensão elétrica / Gabriel da Silva Souza; Paulo Henrique da Luz Santos. - Redenção, 2022.

Orientador: Benedito Lobato.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física) – Universidade do Estado do Pará, Redenção, 2022.

1. Motor Stirling. 2. Arduino. 3. Termodinâmica. 4. Eletricidade. I. Lobato, Benedito, Orient. II. Título.

CDD 537

---

## RESUMO

O presente trabalho consiste na apresentação experimental de um motor Stirling tipo alfa feito com objetos recicláveis para a produção de energia elétrica e, a ferramenta de controle elétrico a ser manipulado será o Arduino como sistema de modulação por largura de pulso (PWM - Pulse Width Modulation). Inicialmente, são demonstrados os tipos de motores Stirling, podendo ser divididos em alfa, gama e beta. Após isso, abordamos sobre o ciclo das máquinas térmicas de Carnot (considerada a máquina com máxima eficiência) de Stirling (na qual a eficiência se aproxima da máquina de Carnot) e sobre a variação da Entropia realizada nos processos térmicos. O referencial teórico expõe, também, sobre as diversas condições de funcionamento, produção e controle de energia, bem como, os combustíveis necessários para a realização do Trabalho. E não menos importante, é apresentado uma abordagem matemática através da modelagem isotérmica de Schmidt, descrevendo a variação do volume de expansão e compressão.

**Palavras chaves:** Motor Stirling, Arduino, produção e controle de energia.

## ABSTRACT

The present work consists of the experimental presentation of an alpha-type Stirling engine made with recyclable objects for the production of electrical energy and the electrical control tool to be manipulated will be the Arduino as a pulse width modulation system (PWM - Pulse Width Modulation). Initially, the types of Stirling engines are demonstrated, which can be divided into alpha, gamma, and beta. After that, we discuss the cycle of Carnot heat engines (considered the engine with maximum efficiency) of Stirling (in which the efficiency approaches the Carnot engine) and the entropy variation performed in thermal processes. The theoretical framework also exposes the various conditions of operation, production, and control of energy, as well as the fuels needed to carry out the Work. And not least, a mathematical approach is presented through Schmidt's isotherm modeling, describing the variation of expansion and compression volume.

**Keywords:** Stirling Engine, Arduino, energy production and control.

## Lista de Símbolos

Simbologia	Unidades	Descrição
$n_{Carnot}$		Eficiência térmica
$T_H$	$K$	Temperatura absoluta de uma fonte fria
$T_L$	$K$	Temperatura absoluta de uma fonte quente
$\Delta S$	$J/K$	Varição de entropia
$\vec{B}$	$T$	Campo magnético
$\vec{V}$	$m/s$	Velocidade de deslocamento de uma espira
$V_L$	$V$	Tensão elétrica no indutor
$V_S$	$V$	Tensão elétrica de entrada
$V_o$	$V$	Tensão elétrica de saída
$L$	$\frac{Wb}{A}$	Indutância
$\Delta i_L$	$A$	Varição de corrente elétrica no indutor
D		Razão cíclica
T	$s$	Período
M	$Kg$	Massa do gás
R	$J/K \cdot Kg$	Constante dos gases ideais
P	$Pa$	Pressão
$V_E$	$m^3$	Volume estântaneo de expansão
$V_C$	$m^3$	Volume estântaneo de compressão
$V_R$	$m^3$	Volume do regenerador
$V_{SE}$	$m^3$	Volume varrido pelo pistão de expansão
$V_{SC}$	$m^3$	Volume varrido pelo pistão de compressão
$V_{DE}$	$m^3$	Volume morto de expansão
$V_{DC}$	$m^3$	Volume moro de compressão
x	$^\circ$	ângulo percorrido pelo disco de embalo
$dx$	$^\circ$	ângulo de defasagem
$P_{mdia}$	$Pa$	Pressão média
$P_{min}$	$Pa$	Pressão mínima
$P_{max}$	$Pa$	Pressão máxima
$X_{DE}$		Relação de volume morto de expansão
$X_{DC}$		Relação de volume morto de compressão

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>9</b>
1.1	Objetivos . . . . .	10
1.2	Objetivos específicos . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>11</b>
2.1	THOMAS SAVERY (1650-1715) . . . . .	11
2.2	THOMAS NEWCOMEN (1663-1729) . . . . .	12
2.3	JAMES WATT (1736-1819) . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>15</b>
3.1	Motor Stirling . . . . .	20
3.2	Máquinas Térmicas: Ciclo de carnot . . . . .	24
3.3	Entropia . . . . .	27
3.4	Ciclo Stirling . . . . .	28
3.5	Matriz Energética De Produção e Consumo: Combustíveis . . . . .	30
3.6	Produção e controle de energia elétrica: Indução . . . . .	33
3.7	Controle de tensão por modulação PWM . . . . .	37
3.8	Modelagem isotérmica de SCHMIDT . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Análise e Discussão de Dados</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Referências</b>	<b>47</b>

# 1 Introdução

A máxima eficiência na produção de trabalho mecânica a partir do menor consumo possível de qualquer forma de energia, é um esforço histórico, visto que a humanidade exerce essa busca desde os primeiros momentos dos quais buscamos ajuda da natureza para moer os grãos da colheita a partir da energia produzida tanto com a força de uma correnteza, quanto dos ventos operando um moinho. Em meio a essas tentativas surgem as máquinas a vapor, que além de substituir a força animal, demonstra o quão importante é a busca por conhecer os meios como a natureza exerce seu papel.

Em meio as pesquisas no campo do eletromagnetismo como conhecemos atualmente, graças a Michael Faraday é possível a geração de energia elétrica, no entanto, após séculos da sua descoberta e inúmeros avanços tecnológicos, ainda assim, o cenário mundial apresenta períodos de crises na produção energética. Mesmo com a junção do poder das máquinas para produção de energia elétrica, muitos de tais mecanismos operam a partir de questões naturais que fogem do controle humano, como crises hídricas em hidrelétricas, ou a ausência de rajadas de vento em certos períodos do ano em usinas eólicas.

Na tentativa de diversificar e contornar tais problemas surgem os combustíveis fósseis, sendo eles de difícil acesso e capazes de produzir um número alto de poluentes como o dióxido de carbono, são ainda utilizados em usinas termoeletricas. Mas desde 2018, segundo a EIA (2022) a demanda por fontes de energias renováveis vem crescendo cerca de 3% ao ano no mundo inteiro, com perspectiva de crescimento até 2050. Com a alta na produção de biocombustíveis, sistemas de microgeração como painéis fotovoltaicos ou baseados na tecnologia Stirling empregam um papel relevante nas inovações tecnológicas ao se buscar meios viáveis e baratos de produzir eletricidade.

Visando demonstrar a versatilidade de produção e controle de eletricidade a partir de máquinas que consomem biocombustíveis, o trabalho busca a partir de um simples sistema de microgeração, mas de grande potencial, demonstrar e analisar os níveis de energia elétrica produzidos por um motor Stirling, e um método de manuseio a partir de um micro controlador Arduino.

A manipulação de microgeradores requer um sistema de controle de potência, tensão e corrente elétrica. Dado um gerador elétrico, seja ele qual for, o que sempre é buscado em tal equipamento é a maior produção de trabalho útil possível, assim, a gama de opções para consumo aumenta na mesma proporção, bastando apenas um circuito elétrico que adequa a necessidade. A partir disso ficam em questão as seguintes hipóteses; quais mecanismos são viáveis para tal controle de tensão elétrico, levando em consideração os limites de produção de energia? E junto a isso, utilizando um motor Stirling como máquina para produção de energia mecânica, o mesmo possui potência o suficiente para tal, ou apresenta tecnologia adequada a ponto de ser relevante como um meio que diversifica o campo de geradores elétricos?

A junção entre fundamentos Físicos e tecnologia atribui sempre novos meios de como ler e interpretar a natureza ao nosso redor. E um dos meios de manipular, aprender e analisar tais junções é aqui sugerido por meio do motor Stirling, onde em meio a sua simplicidade sobreviveu por séculos e ainda é empregado de forma industrial, e o Arduino, que também de forma simples agregada a informática dá ao seu usuário mecanismos palpáveis da programação. Com o intuito de reinterpretar, unificar e demonstrar sua contribuição como um meio paliativo de produção de energia, isso, em duas tecnologias que em primeira instância demonstram ser tão distintas, assim justifica tal trabalho.

## **1.1 Objetivos**

Sendo o motor Stirling uma máquina versátil no quesito consumo de combustível, e ao mesmo tempo por apresentar uma certa simplicidade e baixo custo quando se comparado a máquinas de combustão externa, o objetivo deste trabalho se encaixa em demonstrar de forma experimental a veracidade em tais fatos. E não menos importante, atribuir a tal maquinário um meio útil para seu uso na produção de eletricidade, a ponto de ser possível reproduzir de forma experimental tais conceitos descritos na literatura científica com apenas materiais recicláveis e tecnologia digital.

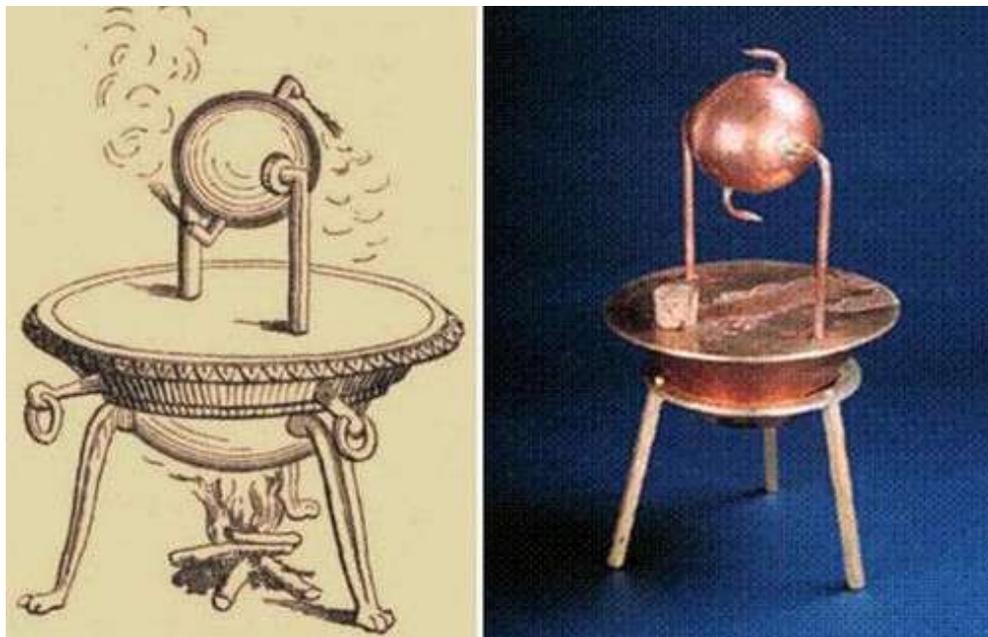
## **1.2 Objetivos específicos**

Como tal trabalho é construído a partir de fundamentos e interpretações Físicas na produção de energia, neste caso, a partir de um motor Stirling construído com materiais reutilizáveis, a ferramenta de controle elétrico a ser manipulado será o Arduino como sistema de modulação por largura de pulso (PWM - Pulse Width Modulation). E não menos importante, se tratando de uma máquina de combustão externa, será usado como combustível o álcool etílico hidratado, por ser um derivado de biocombustíveis e de fácil acesso. Assim, em operação poderão ser medidos e analisados os níveis de potência e eficiência alcançados por tal máquina e as características pertinentes à corrente elétrica produzida junto a eficácia na manipulação do mesmo por um microcontrolador baseado em programação computacional.

## 2 Estado da Arte

Ao longo da história da Antiguidade, sabia-se que o calor era capaz de produzir vapor e através do vapor, trabalho mecânico. Porém, teoricamente isso não era muito bem compreendido pelos estudiosos. Foi então que um homem chamado Herão de Alexandria, para divertimento das pessoas, pressupõe-se, que ele criou a primeira máquina térmica chamada de "eolípila", conforme mostrado na figura abaixo:

**Figura 1:** Máquina térmica de propulsão a vapor



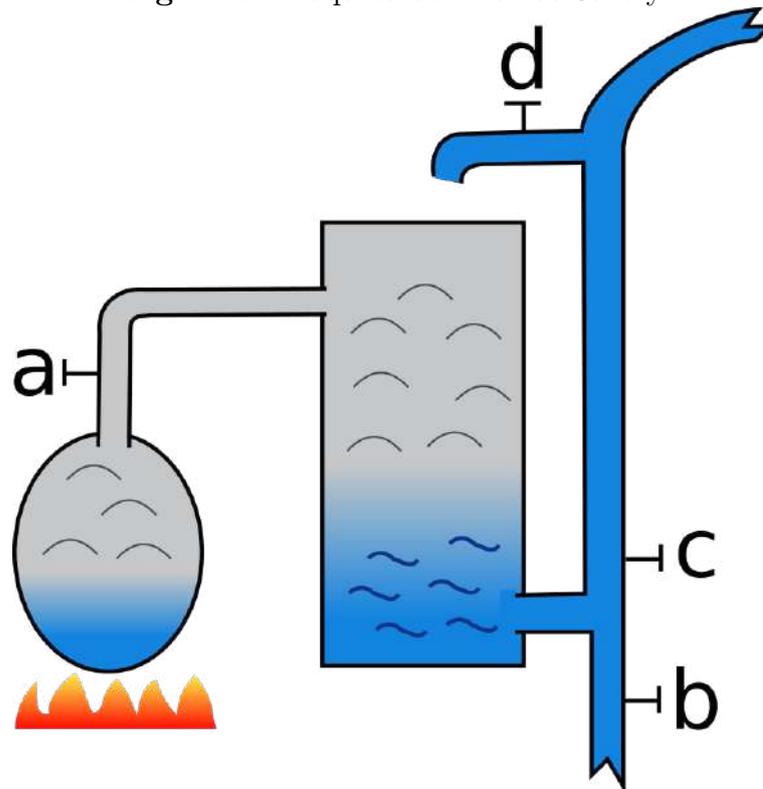
Fonte:<https://bit.ly/3BhBZho>

O que acontece neste experimento é que, ao aquecer a água, o vapor de água é expulso do reservatório pelos dois canalículos, fazendo com que a esfera acoplada gire, tendo a mesma representação de um irrigador de jardim dos dias atuais (GASPAR, 2013).

### 2.1 THOMAS SAVERY (1650-1715)

Thomas Savery foi um engenheiro militar inglês que foi a primeira pessoa a criar, em 1698, uma máquina a vapor de interesse comercial e industrial, devido à grande necessidade de bombeamento de água do fundo dos poços das minas de carvão.

**Figura 2:** Máquina de Thomas Savery



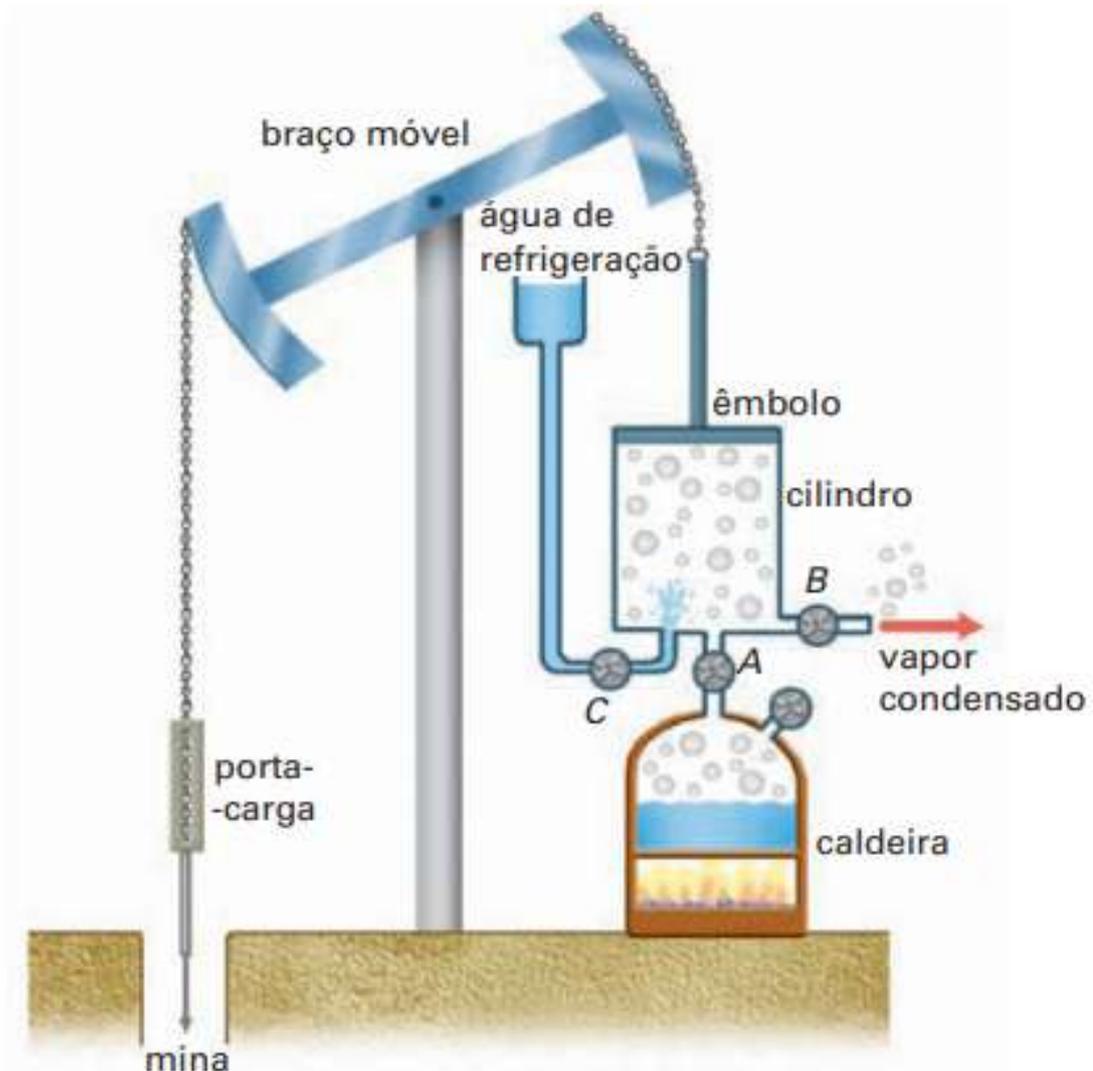
**Fonte:** <https://bit.ly/3zagzjd>

Esse é o esquema ilustrativo da máquina a vapor criada por Thomas Savery, que funcionava da seguinte maneira: Eram fechadas as válvulas A e B e as válvulas C e D eram abertas. Com isso, a água de refrigeração da válvula C banhava externamente o cilindro fazendo-o resfriar e, conseqüentemente, o vapor dentro do cilindro esfriava e condensava, diminuindo a pressão interna do cilindro e aumentando a pressão atmosférica, fazendo com que a água do poço subisse até o cilindro, passando pela válvula D. Após esse processo, eram abertas as válvulas A e B e fechadas as válvulas C e D, e o resultado disso era que o vapor produzido na caldeira pressionava a água contida no cilindro, impulsionando-a até o nível do solo. Após o cilindro ser esvaziado, as válvulas A e B eram fechadas e as válvulas C e D eram abertas, repetindo-se o ciclo (GASPAR, 2013).

## 2.2 THOMAS NEWCOMEN (1663-1729)

Devido as constantes explosões da caldeira e do cilindro, devido à alta pressão para gerar vapor e necessária para o funcionamento da máquina criada por Savery, o também inglês Thomas Newcomen, foi o responsável pelo aprimoramento e evolução dessas máquinas, ao inventar uma máquina capaz de produzir vapor à baixa pressão e transportar, além de água, outros objetos e cargas.

**Figura 3:** Máquina de Thomas Newcomen



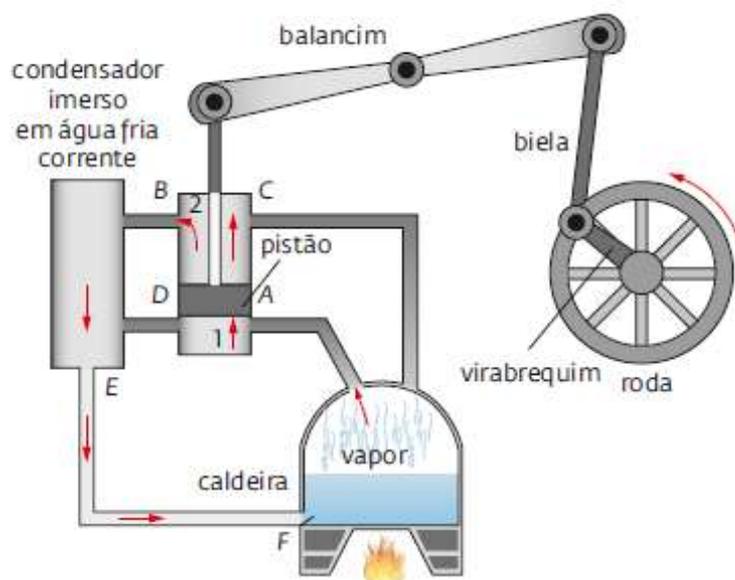
**Fonte:** GASPAR (2013)

O funcionamento desta máquina térmica pode ser descrito da seguinte forma: Abre-se a válvula A, liberando o vapor produzido à baixa pressão gerado pelo aquecimento da caldeira e, mantendo a válvula B fechada, faz-se com que a pressão interna no cilindro aumente e o êmbolo é elevado por essa pressão, fazendo com que o braço móvel seja movimentado para cima e, conseqüentemente, o porta-carga desce até o fundo da mina. Posteriormente, a válvula A é fechada e as válvulas B e C são abertas, realizando o resfriamento do cilindro pela válvula C e, seguidamente, o vapor condensado é liberado pela válvula B, com isso, a pressão interna do cilindro diminui e a pressão atmosférica faz com que o êmbolo desça, movimentando o braço móvel para baixo e o porta-carga sobe para a superfície. Fechando novamente a válvula A e abrindo as válvulas B e C, o ciclo se reinicia (CARMAGO, 2001).

## 2.3 JAMES WATT (1736-1819)

Após a resolução feita por Thomas Newcomen do problema das explosões da caldeira e do cilindro, a máquina térmica de Newcomen tinha ainda uma desvantagem, a perda de calor e a redução do rendimento devido o cilindro ter que ser aquecido novamente após se reiniciar o ciclo. Porém, por volta de 1765, esse problema da perda de calor foi contornado pelo escocês James Watt. Durante o conserto de uma dessas máquinas, ele observou que o problema estava no constante aquecimento das paredes do cilindro após o resfriamento para a condensação do vapor. Foi então que Watt teve uma ideia simples: criar um condensador separado do cilindro, com isso, ele tinha um recipiente sempre quente (cilindro) e um recipiente sempre frio (condensador), conforme a figura abaixo:

**Figura 4:** Máquina de James Watt



**Fonte:** MÁXIMO, et al. (2016)

Neste esquema ilustrativo, o vapor entra no cilindro pela válvula A e empurra o pistão para cima, acionando o balancim que, ligado à biela e ao virabrequim, realiza o movimento de rotação na roda. Quando este pistão sobe, o vapor é empurrado e tem o seu escape pela válvula B (aberta), entrando no condensador banhado por água fria corrente. Após isso, as válvulas A e B são fechadas e as válvulas C e D são abertas, fazendo com que o vapor entre pela válvula C e, consequentemente, o pistão desce e o vapor que estava abaixo do pistão é empurrado pelo pistão, tendo sua saída do cilindro e entrada no condensador pela válvula D. Com isso, o balancim é obrigado a descer, continuando o movimento de rotação da roda. Esse excelente trabalho realizado por James Watt foi utilizado tanto para retirar a água no poços das minas subterrâneas, como, para movimentar moinhos, sendo de grande importância para a revolução industrial que já acontecia nessa época (MÁXIMO, et al. 2016).

### 3 Metodologia

Tendo em posse de um motor Stirling de configuração alfa, construído a partir de materiais recicláveis feitos de alumínio, o gás de trabalho utilizado será o próprio ar, e como combustível para a sua operação o álcool etílico. O motor utilizado foi construído a partir dos seguintes itens:

- Uma lata de tinta spray;
- lata de leite em pó;
- conectores de fio elétrico;
- palha de aço;
- raios de bicicleta;
- CDs;
- latas de refrigerante 350 ml;
- tira de corda;
- tira de borracha;
- rolamento 4x13x5;
- mangueira de nível;
- balões comuns de aniversário;
- tampas de garrafa pet.

A câmara de expansão foi construída unindo o fundo da lata de tinta spray com a parte superior de uma lata de refrigerante 350 ml. Com o fundo da mesma lata de refrigerante foi presa a mangueira de nível de 12,5 cm, e sua ponta posterior foi colocada na tampa da tinta spray que resultará em uma câmara de compressão. Para finalizar o conjunto, foi montado um pistão maleável prendendo o balão entre duas tampas de refrigerante junto a tira de borracha, e unindo tudo com uma haste do raio de bicicleta, prendendo devidamente na tampa de tinta spray. Assim, o conjunto pode ser encaixado e desmontado com facilidade. Para finalizar toda estrutura, parte de uma lata de leite em pó foi presa a lata de tinta spray com cola de silicone, de forma a montar um recipiente de refrigeração.

**Figura 5:** Câmara de compressão e expansão



**Fonte:** Elaborado pelo autor

O pistão da câmara de expansão foi montado fixando com os conectores de fio elétrico entre duas “tampas” da lata de refrigerante a um raio de bicicleta de 16,7 cm, e mantendo - as devidamente espaçadas em 4,5 cm. Entre o espaço deixado, foi preenchido de palha de aço finalizando assim um pistão do qual permite de forma parcial a passagem do gás de trabalho através dele.

**Figura 6:** Pistão da câmara de expansão

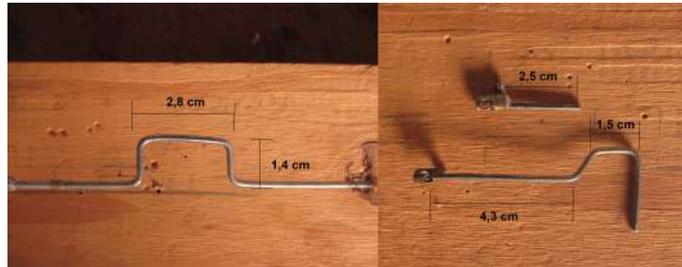


**Fonte:** Elaborado pelo autor

Os demais raios de bicicleta foram usados para montar um virabrequim e uma biela. Ambos os pistões de trabalho e expansão foram unidos ao virabrequim por meio da biela

e uma haste de forma que mantivessem um ângulo de aproximadamente  $90^{\circ}$ . Para isso foram utilizados conectores de fio elétrico com um furo lateral como apresentado na figura 7.

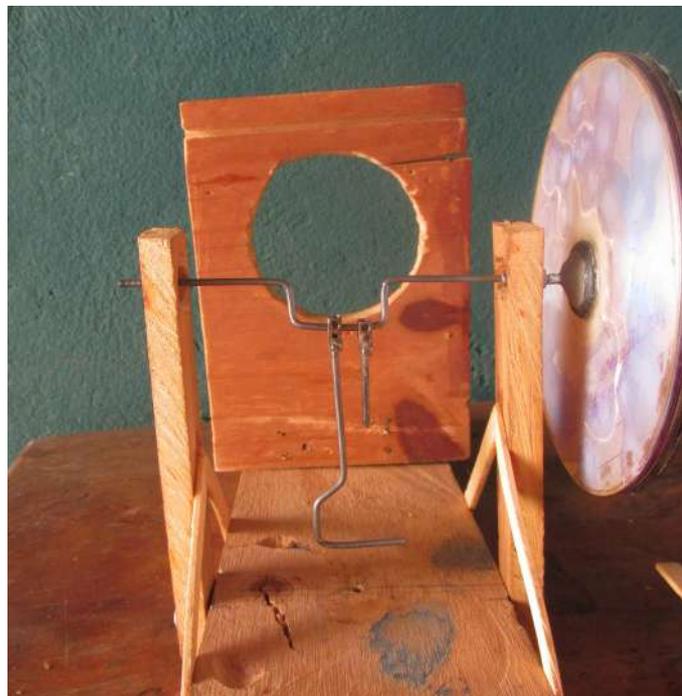
**Figura 7:** Virabrequim, biela e haste de ligação da câmara de compressão



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Logo, a uma estrutura de madeira foram presos os rolamentos de forma a servirem de apoio ao virabrequim e em uma de suas extremidades foi preso um disco de embalo. Logo, o pistão feito de palha de aço ficará na câmara de fonte quente, enquanto que o pistão maleável será encaixado na tampa de tinta spray. As demais peças da imagem 7 se uniram de acordo com a imagem 7.1.

**Figura 7.1:** Estrutura de apoio



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Unindo todas as peças o motor Stirling de modelo alfa ficará como na imagem abaixo. Para o gerador, foi elaborada apenas uma armação simples com palitos de picolé.

**Figura 7.2:** Motor Stirling modelo alfa



**Fonte:** Elaborado pelo autor

A fim de buscar dados pertinentes ao que foi abordado como objetivos do trabalho, tal pesquisa se enquadra nos aspectos quantitativos, sendo assim, possível justificar e até mesmo avaliar fenômenos Físicos de forma explicativa. E não menos importante, sendo uma manipulação experimental, para controle e produção de sinais PWM o Arduino se encaixa para tal feito chaveando um MOSFET, que por sua vez, se encaixa como o responsável pelo controle de tensão elétrica produzido pela máquina térmica ligada a um motor elétrico de corrente contínua. A fim de manter o controle de tensão de forma menos física possível, no lugar de um potenciômetro convencional será utilizado como escala de intensidade as teclas de 0 a 9 de um computador comum. Para isso com o monitor serial, onde nada mais é que um mecanismo de troca de informações por meio de texto entre um computador e o próprio microcontrolador, assim, diminuimos o número de portas requisitadas do arduino abrindo espaço para quaisquer outras funções de implementação.

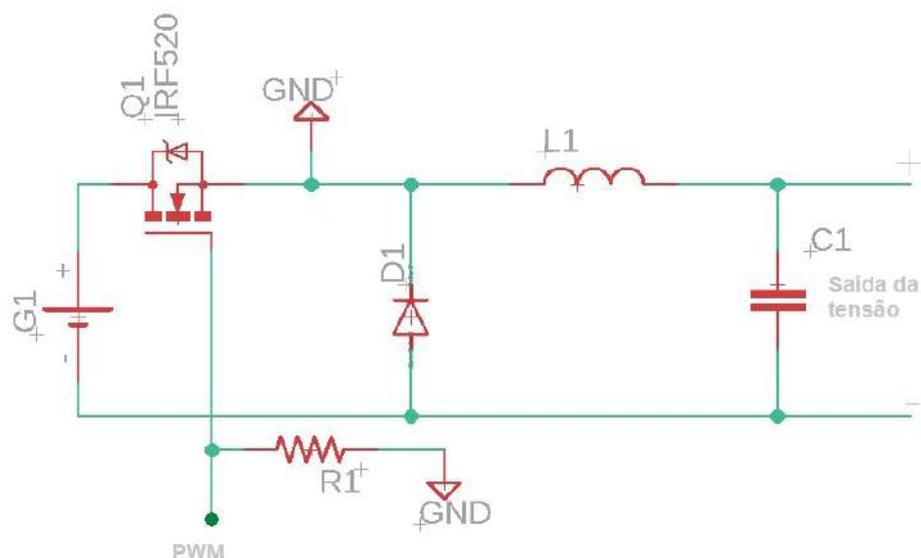
O sistema experimental para controle de tensão de corrente contínua utiliza de componentes simples encontrados em sucata eletrônica, sendo a parte digital proveniente do microcontrolador arduino. Para efeito do mesmo, foram utilizados os seguintes itens:

- Multímetro;
- Arduino Uno;
- Indutor  $220\mu H$ ;
- Capacitor  $100\mu F$ ;
- Diodo schottky;

- Protoboard;
- Jumpers;
- MOSFET IRF520;
- Motor elétrico de 5 volts;
- bateria 9v;
- potenciômetro.

Se tratando de um conversor Buck, o sistema físico tem seu esquema apresentado a imagem-8, sendo a parte digital ligada ao gate do MOSFET, e a parte negativa ao pino gnd do arduino. No circuito que criamos, é empregado ao transistor um resistor de pull-down que descarrega o terminal de entrada do sinal PWM(modulação por largura de pulso) toda vez que a chave é aberta durante os pulsos. O programa que construímos a partir da linguagem de programação C utiliza do pino 3 do arduino como saída do sinal PWM, sendo ele controlado graças a uma constante de proporção calculada e inserida na variável “P” do programa (imagem 9).

**Figura 8:** Esquema do sistema PWM



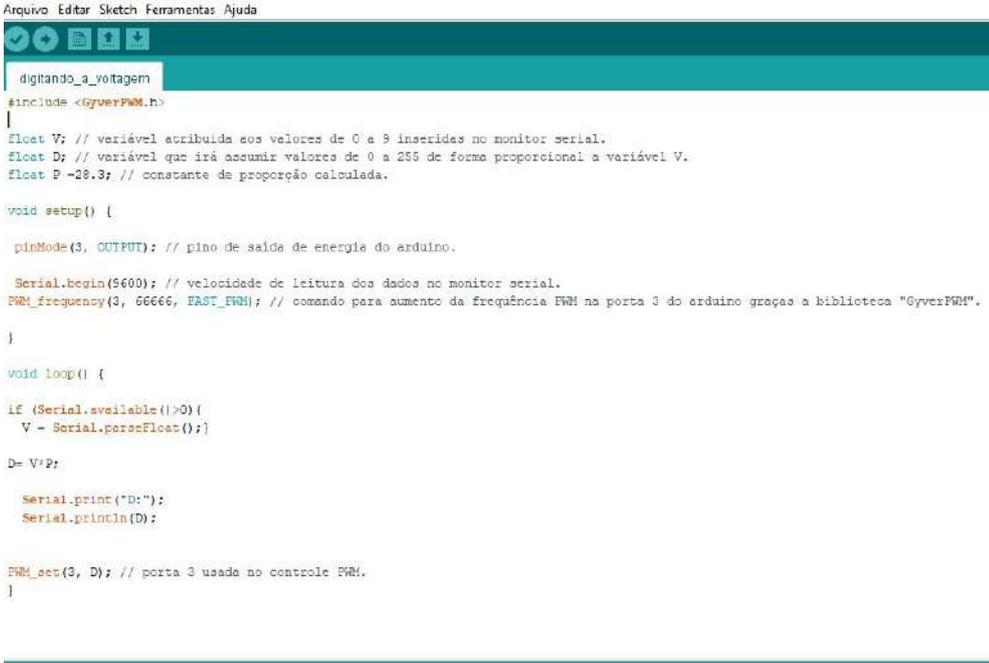
**Fonte:** Elaborado pelo autor

O programa convencional de controle PWM fornecido pela plataforma Arduino, consiste em utilizar as portas analógicas. Provocando uma variação de tensão nos pinos de 5v e gnd, a partir de um potenciômetro, tal efeito será lido pelo pino A3 também ligado

ao potenciômetro. Com algumas manipulações simples o programa é capaz de converter a variação de tensão em valores que irão de 0 a 255, que por sua vez, serve de escala pelo arduino para controlar o sinal PWM ( ARDUINO, 2022).

Para manipular os valores lidos pelo arduino, o número 255 foi dividido em nove partes iguais, assim, podemos usar as teclas do computador de 0 a 9 com meio tangível do controle de tensão. Chamando o resultado da divisão de constante “P” temos como resultado o valor 28.3, assim, classificando-o como um dado de ponto flutuante (float) e o executando como um produto entre os valores escritos no monitor serial (variável V ) ganhamos como resultado valores que iram de 0 a 255 (imagem 9) que nos dá a liberdade de utilizar valores decimais que aumentaram a precisão do sistema.

**Figura 9** - Programa utilizado no arduino



```
Arquivo  Editar  Sketch  Ferramentas  Ajuda
digitando_a_voltagem
#include <GyverPWM.h>
float V; // variável atribuída aos valores de 0 a 9 inseridas no monitor serial.
float D; // variável que irá assumir valores de 0 a 255 de forma proporcional a variável V.
float P =28.3; // constante de proporção calculada.

void setup() {
  pinMode(3, OUTPUT); // pino de saída de energia do arduino.

  Serial.begin(5600); // velocidade de leitura dos dados no monitor serial.
  PWM_frequency(3, 66666, FAST_PWM); // comando para aumento da frequência PWM na porta 3 do arduino graças a biblioteca "GyverPWM".
}

void loop() {
  if (Serial.available()>0) {
    V = Serial.parseFloat();
  }

  D= V*P;

  Serial.print("D:");
  Serial.println(D);

  PWM_set(3, D); // porta 3 usada no controle PWM.
}
```

**Fonte:** Elaborado pelo autor

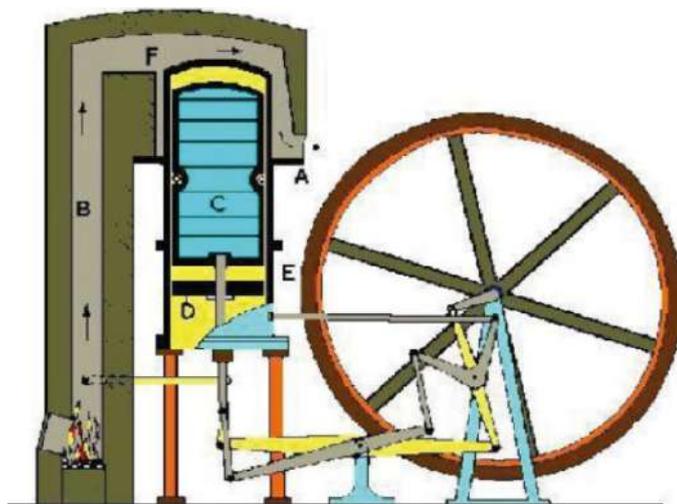
E não menos importante, segundo a plataforma arduino ([www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)) a frequência de operação do modelo UNO é de no máximo 980 Hz. Por ser uma frequência baixa de operação, é comum haver uma oscilação grande dependendo do nível da intensidade da tensão elétrica. Sendo assim, será utilizado uma biblioteca denominada de “GyverPWM” amplificando a frequência de operação do pino 3 para 66666 Hz.

### 3.1 Motor Stirling

Inventado no início do século XIX, em meio aos desastres causados por acidentes com máquinas a vapor, o engenheiro Robert Stirling apresentava à indústria um dos

motores mais simples já criados, com a promessa de serem eficientes e ao mesmo tempo garantir a segurança daqueles que a operam. O motor stirling consiste de uma máquina térmica a combustão externa, do qual realiza trabalho mecânico a partir de um fluido de trabalho interno e constante, mantendo um ciclo termodinâmico em meio a dois pistões; um inerente a uma câmara de expansão da qual recebe calor a partir de uma fonte quente, e um segundo êmbolo presente a uma câmara de compressão da qual despeja calor em uma dada fonte fria (SIER, 1995).

**Figura 10** - Primeiro modelo operante

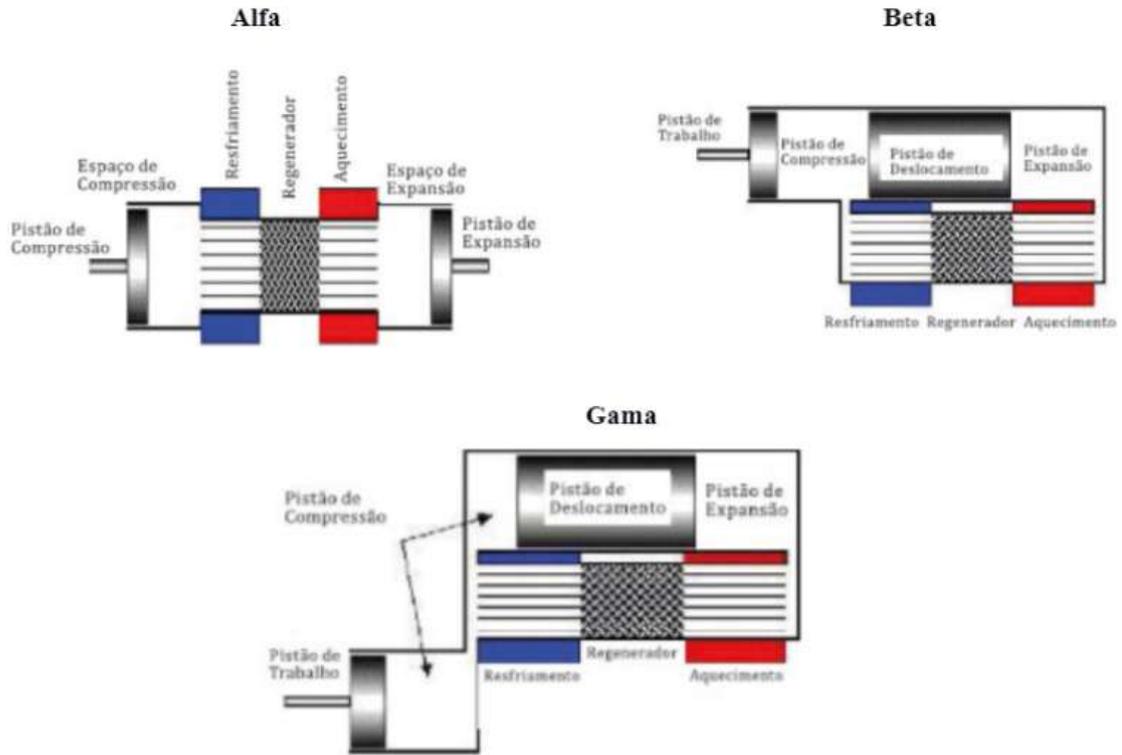


**Fonte:** Barros (2005)

O motor stirling teve seu modelo reestruturado no fim do século XX. Com um desempenho de cerca de 30 % em relação ao que é consumido e produzido de energia, seu uso foi bastante explorado nos anos de 1980 em meio a crise do petróleo. Por se tratar de uma máquina a combustão externa, de forma a não alterar a composição do fluido de trabalho como as máquinas de combustão interna, o motor apresenta uma grande versatilidade nos meios a serem utilizados como combustível. E por consequência, com o aumento significativo de poluentes atmosféricos pesquisas foram desenvolvidas para que o melhor de tal máquina fosse retirado, isso, a um baixo custo energético e baixa emissão de poluentes(MEDINA, 2017)

Dentre essas pesquisas, dos modelos desenvolvidos inicialmente pela philips company em 1930, se destacam três modelos denominados como alfa, beta e gama, ambos equipados com dois pistões, mas, associados em configurações distintas apresentando, assim, um desempenho característico a cada um(MARTINI, 1983). Sendo eles estruturados da seguinte forma:

**Figura 11 - Configurações do motor Stirling**



**Fonte:** Melo (2002)

Os modelos alfa apresentam dois pistões associados em câmaras distintas, sendo assim, os mais simples a serem fabricados, separados apenas por um regenerador, que por sua vez a nível industrial costuma a ser equipado em ambas as configurações. O motor Stirling do tipo beta possui ambos os pistões no mesmo compartimento, tornando sua fabricação mais complexa, no entanto, rende a maior performance entre os três. A configuração do tipo gama é equivalente a do tipo beta, com a diferença em que os dois pistões estão inseridos em câmaras distintas, podendo dividir o mesmos espaços nos processos de compressão e expansão.

Outros fatores que foram levados em consideração na sua fabricação, além das configurações em relação a estrutura mecânica foi quanto à espécie do fluido de trabalho. Como deve sempre haver um fluxo de calor entre duas fontes com a maior variação de temperatura possível, tal gás por sua vez deve se apresentar como um bom condutor térmico, e em contrapartida, sua viscosidade deve ser baixa visto que deve haver um escoamento alternado entre as câmaras de expansão e compressão (BARROS, 2005).

As primeiras opções de fluido de trabalho que vieram a substituir o ar foi a troca pelo Hélio e Hidrogênio, fazendo esses também parte das pesquisas desenvolvidas pela Philips, onde ao mesmo tempo que buscavam a aumentar a eficiência da máquina, lidavam com problemas relacionados a vedação, ficando em muitas das vezes a mercê da segunda opção por sua abundância, ainda mais, se levado em consideração as dificuldades de se obter

tal elemento na década de 30 (RODRIGUES, 2017). E não menos importante, apesar da sua simplicidade, mecanismos que aumentem ou diminuam o seu RPM (rotação por minuto) como um acelerador não se mostram viáveis, sendo assim, graças a sua constância de operação são utilizados industrialmente na produção de energia elétrica.

A partir dessas concepções, o motor Stirling fez parte da criatividade de inúmeros pesquisadores. Construindo um modelo gama do qual possuísse a menor fricção possível entre os seus componentes, e estabelecendo um pistão de trabalho de diâmetro muitas vezes menor do que o presente na câmara de expansão, o matemático James Senft foi capaz de modelar um motor do qual é capaz de produzir trabalho com a apenas 4 °C de variação de temperatura entre os cilindros (SENF, 1996). Motores do tipo gama de baixa temperatura se tornam operantes até mesmo com o calor da mão, ou qualquer objeto que apresente uma pequena variação de temperatura em relação ao ambiente como uma xícara com café (figura - 12).

**Figura 12** - Motor Stirling de baixa temperatura



**Fonte:** [stirlingengine.co.uk](http://stirlingengine.co.uk) (2020)

Mas, o modelo mais utilizado atualmente, principalmente em microgeradores residenciais, são os motores Stirling de pistão livre. Desenvolvido em 1964 por William Beale, o Free Piston Stirling Engine se tornou uma revolução para tal maquinário, pois em vez de utilizar dois pistões semelhante a uma configuração beta, o motor utiliza um espaço extra classificado como espaço de resalto que funciona como um amortecedor, oscilando o pistão de expansão de forma senoidal (WALKER; SENFT, 1985).

**Figura 13** - Motor Stirling de pistão livre



**Fonte:** sunpowerinc.com

Após a sua notável realização com tal projeto, em 1974 Beale dá início a empresa Sunpower, produzindo motores Stirling de pistão livre com a capacidade de serem sustentados por radiação nuclear (figura 13), vindo a ser futuramente explorado também pela nasa (URIELI, 2020).

### 3.2 Máquinas Térmicas: Ciclo de Carnot

Os motores Stirling são, nada mais, que máquinas térmicas que teoricamente se aproximam da máxima eficiência que uma máquina térmica pode atingir. Essa eficiência, que em condições ideais pode ser comparada com o motor de Carnot.

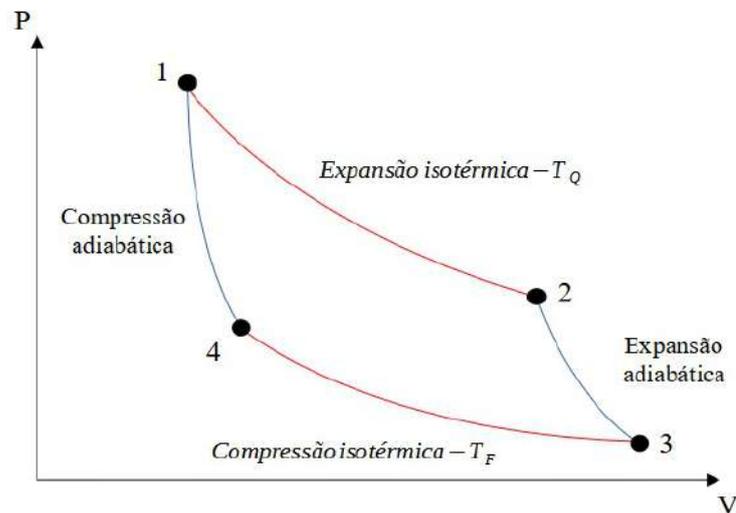
Em 1824, o físico Nicolas Léonard Sadi Carnot na sua obra chamada “Reflexões sobre o poder motriz do calor e sobre máquinas que servem para desenvolver esse poder” Carnot (1824) inicia falando que: “É bem conhecido que o calor pode ser utilizado como causa do movimento, e que é muito grande o poder motriz que dele podemos obter. O motor a vapor, de uso comum hoje em dia, é uma prova clara deste fato.” A razão para isto, seria dada em relação ao questionamento sobre a existência de um limite da potência motriz do calor ou se essa potência seria algo ilimitado, ou seja, se as máquinas poderiam ter um aumento susceptível de aperfeiçoamento.

Com os diversos problemas que as máquinas térmicas apresentavam, como, por exemplo, o atrito e a perda de calor, as máquinas não operam com a máxima eficiência. Com isso, Carnot sugeriu um motor ideal, chamado de motor de Carnot. Livre de todos os problemas que as máquinas comuns tinham, que, conforme Passos (2003) “Carnot descreve um ciclo ideal para um sistema constituído de um gás, contido em um cilindro equipado com um êmbolo livre, sem atrito.”

O processo é realizado em quatro etapas que alternam entre si, sendo duas transformações isotérmicas, que se consiste quando a temperatura do sistema permanece constante,

e duas adiabáticas, que é um processo muitas vezes de expansão ou compressão rápida, onde nenhum calor entra e nem escapa do sistema, como resultado, um líquido ou gás sofre uma expansão de resfriamento ou um aquecimento por compressão.

**Figura 14** - Diagrama PxV do ciclo Carnot



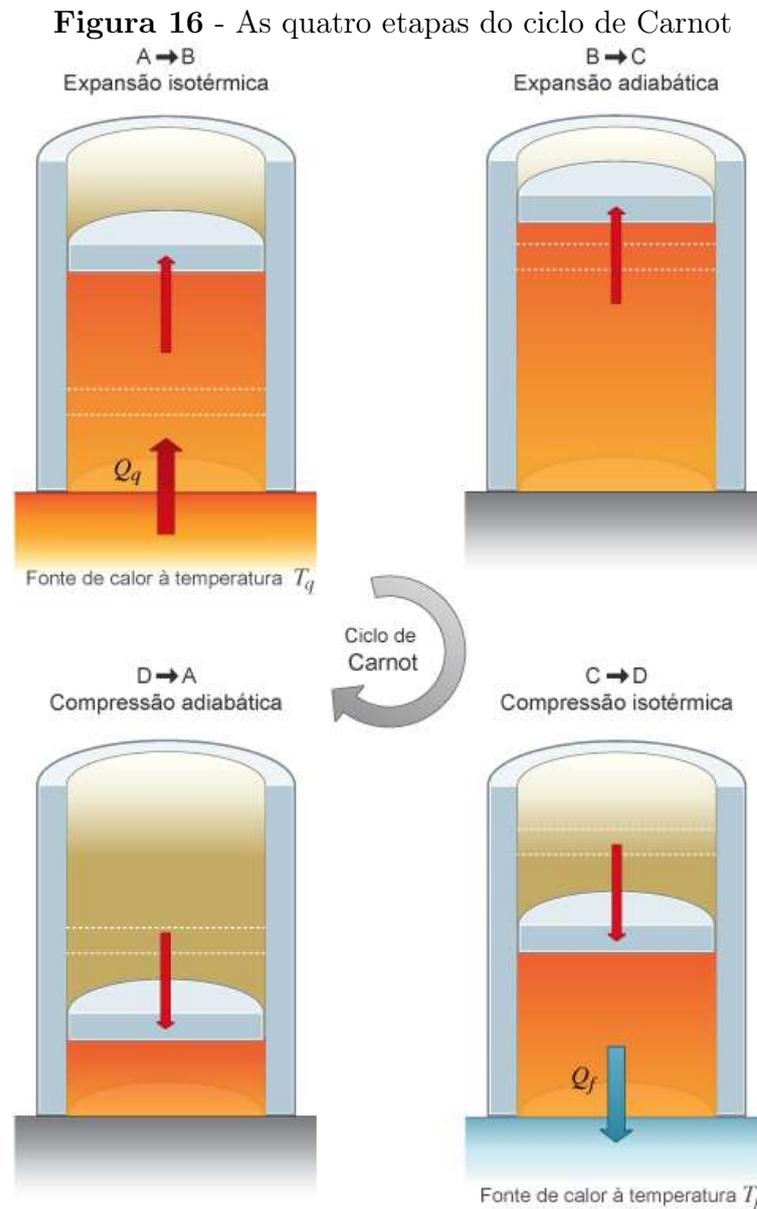
**Fonte:** Elaborado pelo autor

Como mostra o diagrama p-v da figura 14, durante os processos 1-2 e 2-3, o gás de trabalho está se expandindo, realizando um trabalho positivo e esse trabalho é dado pela área da curva 123. Nos processos 3-4 e 4-1, o gás de trabalho sofre uma compressão, sendo o trabalho, dessa vez, negativo, em vista do ambiente está realizando trabalho sobre o gás. Esse trabalho é representado pela curva 345.

No primeiro processo, que iremos denominá-los de A para B, um gás confinado em um cilindro fornecido de um pistão móvel entra em contato com uma fonte em alta temperatura, então, uma quantidade de calor é absorvida pelo gás que se expande isotericamente conforme a pressão diminui, realizando trabalho  $W$  e empurrando o pistão, aumentando assim o volume dentro do cilindro. No segundo processo, de B para C, o cilindro é colocado em uma base isoladora, onde a ocorre uma expansão adiabática, ou seja, não entra e nem sai do sistema energia sob a forma de calor.

Vale ressaltar também, que essa expansão é tanta que a pressão diminui ao seu nível mais baixo e a temperatura do gás também diminui, realizando mais uma vez Trabalho ( $W$ ), movendo o pistão. No terceiro processo, de C para D, o cilindro é extraído da base isolante e colocado em uma fonte de baixa temperatura. Uma quantidade de calor é removida do gás na medida que se comprime isotericamente. Desta forma, o pistão move-se de forma a diminuir a área dentro do cilindro, onde, novamente é realizado Trabalho ( $W$ ) sob o gás que é comprimido. Com isso, durante esse processo é transferindo energia sob forma de calor do gás para a fonte fria. No quarto processo, de D para A, o cilindro é

reposicionado novamente em uma base isolante onde é comprimido adiabaticamente ao seu estágio de origem, onde, mais uma vez é realizado Trabalho (W), movendo o pistão e comprimindo o gás, aumentando novamente a temperatura, sem a ocorrência de troca de calor. (IST, 2009). Todos esses processos podem ser visualizados na Figura abaixo:



**Fonte:** [e-escola.tecnico.ulisboa.pt/topico.asp?id=577](http://e-escola.tecnico.ulisboa.pt/topico.asp?id=577)

Então, uma máquina ideal é aquela que tem a maior eficiência possível para os limites de temperatura dentro da qual funciona, e esse rendimento máximo pode demonstrando pela seguinte expressão:

$$n_{Carnot} = 1 - \frac{T_H}{T_L} \quad (1)$$

Onde,  $T_L$  é a temperatura absoluta da fonte quente e  $T_H$  é a temperatura absoluta da fonte fria

### 3.3 Entropia

A reversibilidade de um processo é dada quando todos os ciclos voltam ao seu estado inicial, começando novamente o ciclo. Ou seja, tanto no ciclo Carnot, como no ciclo Stirling, os processos são reversíveis. Dado isso, a entropia é considerada uma propriedade do estado de um sistema, ou seja, ela não depende de qual modo ou critério se estabeleceu para que ela chegasse nesse estado atual. Isso também é válido para a temperatura, a pressão e a energia. Com isso, a equação da variação de entropia  $\Delta S$  de um processo reversível é dada da seguinte forma,

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad (2)$$

onde,  $Q$  é a energia transferida na forma de calor, e  $T$  é a temperatura do sistema em kelvins, sendo a unidade de entropia do SI, o joule por kelvin. No caso da variação de entropia de um processo isotérmico reversível, a equação da variação de entropia é reduzida para a seguinte forma:

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{dQ}{T} \quad (2.1)$$

Com isso, para que a temperatura  $T$  permaneça constante durante a expansão isotérmica, uma quantidade de calor  $Q$  deve ser transferida para o gás, fazendo com que  $Q$  seja positivo, aumentando a entropia do gás durante o processo (HALLIDAY e col., 2016).

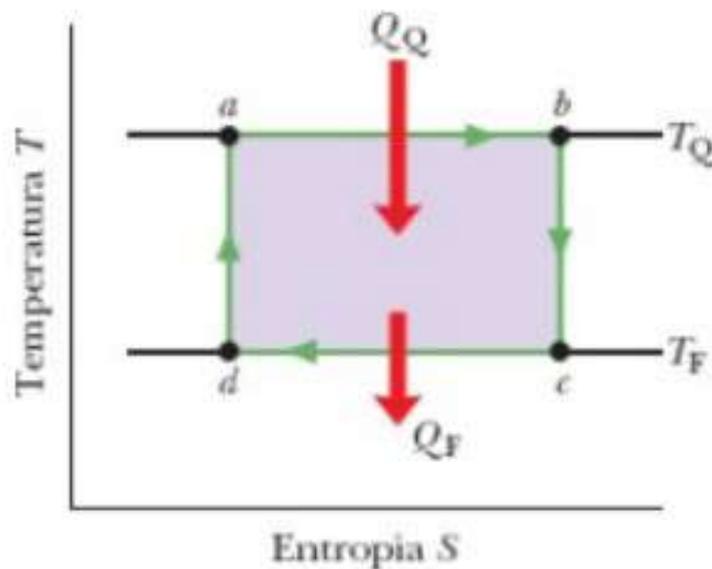
No ciclo Carnot, podemos calcular a variação da entropia  $\Delta S$  através das transferências de energia reversíveis na forma de calor. Com isso, temos duas variações da entropia no gás de trabalho, uma à temperatura  $T_Q$  e outra à temperatura  $T_F$ . Sendo assim, a variação líquida de entropia pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\Delta S = \Delta S_Q + \Delta S_F = \frac{|Q_Q|}{T_Q} - \frac{Q_F}{T_F} \quad (2.2)$$

Com isso, temos que  $\Delta S_Q$  é positiva, pois a energia na forma de calor  $|Q_Q|$  é adicionado no gás de trabalho, aumentando a entropia do sistema. Já a energia  $|Q_F|$ , é removida do gás de trabalho na forma de calor ocasionando a diminuição da entropia, passando a ser negativa. Como citado anteriormente, a entropia é uma propriedade ou uma função do estado de um sistema, ou seja, a variação da entropia será  $\Delta S = 0$ , feito um ciclo completo. Substituindo isso na nossa equação, temos que,

$$\frac{|Q_Q|}{T_Q} = \frac{|Q_F|}{T_F} \quad (2.3)$$

**Figura 17** - Diagrama T - S aplicado ao ciclo carnot



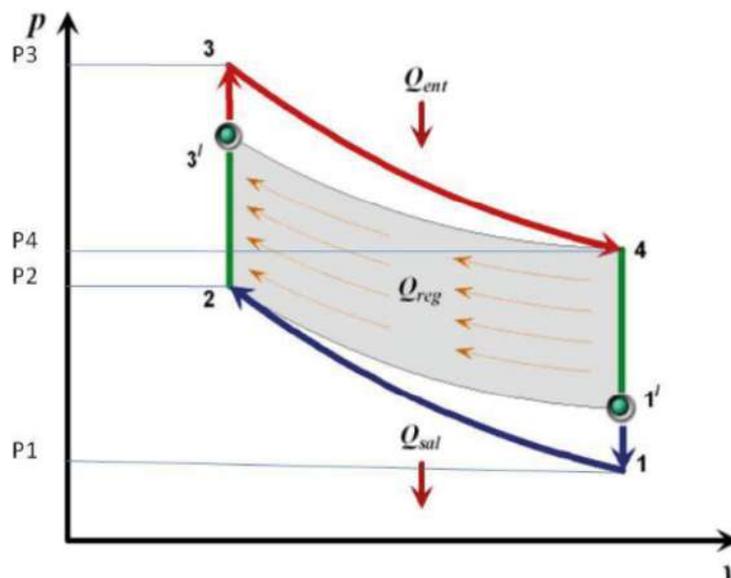
**Fonte:** Halliday (2016)

### 3.4 Ciclo Stirling

Como qualquer máquina térmica, para que o motor se mantenha operante há a necessidade do fluxo de calor gerado por uma fonte até uma dada fonte fria através de um fluido de trabalho. Mas, para que os modelos ideais tidos de forma teórica fossem possíveis, a realidade deveria obedecer preceitos como; fontes isotérmicas, e regeneradores ideais. Para que os processos termodinâmicos se mantenham periódicos com a menor perda energética possível, se é utilizado de regeneradores na tentativa de manter o fluxo de calor que pode ser dissipado nas estruturas do motor (SOUSA, 2009).

O ciclo Stirling opera, também, em quatro processos como, porém, a diferença do Ciclo Stirling é que os dois processos isotérmicos não são ligados de forma adiabática, como no Ciclo de Carnot, mas sim, por meio do volume constante, conforme mostrado no diagrama P-V, da Figura 18.

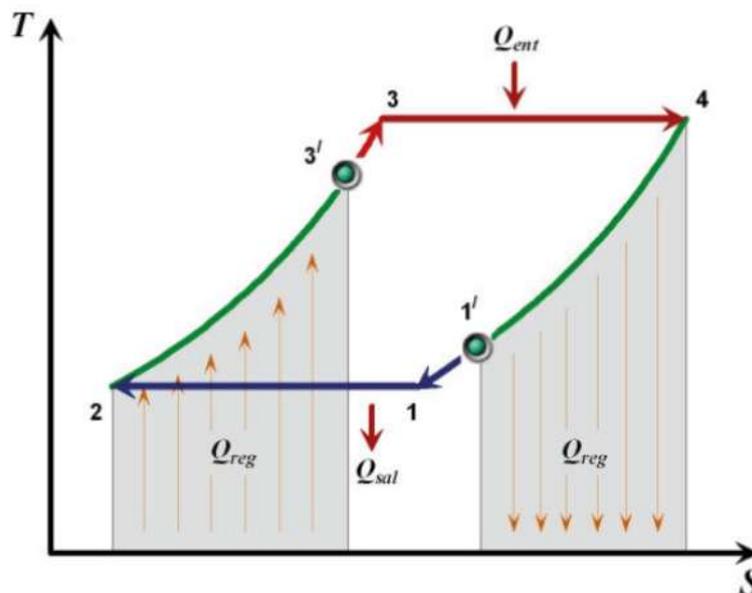
**Figura 18** - Diagrama Pressão e Volume do ciclo Stirling



Fonte: Omaña (2007)

No ciclo de Stirling, considerado ideal, os processos termodinâmicos são reversíveis, ou seja, retornam exatamente ao seu estado inicial. Porém, uma máquina térmica só é perfeita na imaginação, onde a energia extraída em forma de calor pode ser transformada 100% em trabalho, sendo, dessa forma, violada a segunda lei da termodinâmica. (HALLIDAY e col., 2016)

Figura 18.1 - Diagrama Temperatura e Entropia do ciclo stirling



Fonte: Omaña (2007)

### 3.5 Matriz Energética De Produção e Consumo: Combustíveis

Com o aumento da dependência humana por tecnologia, tanto na produção de commodities, bens materiais de consumo que facilitam a vida desde mecanismos na área da medicina, há sempre a necessidade da produção de energia, principalmente a elétrica. Na tentativa de não se limitar aos combustíveis fósseis como o petróleo, nações como o Brasil tem buscado explorar fontes de energias renováveis que além de possuírem um baixo custo de produção, possui um acesso mais diversificado se distribuindo em, biomassa, eólica, solar e hidrelétrica. Até 2023 estima-se que cerca de 83% das fontes de produção de energia esteja focada em fontes renováveis no Brasil, visto que se analisado apenas a utilização do bagaço da cana como combustível em usinas termelétricas, pode ser gerado até  $7 \cdot 10^8 kWh/ano$  de eletricidade (OLIVEIRA, et al, 2018).

Com essas perspectivas em relação ao consumo de fontes renováveis, o motor stirling pode-se manter operante com eficiência a partir da queima de biomassa, e até mesmo usando como fonte de calor a própria radiação solar.

No que diz respeito a geração de eletricidade a partir de motor stirling alimentado por radiação solar, sua estrutura é comumente equipada por um concentrador solar parabólico. Coletores solares têm como função doméstica seu uso no aquecimento de água ou na produção de eletricidade a partir de células fotovoltaicas, sendo eles envidraçados, são capazes coletarem cerca de  $1000KW/m^2$  da radiação solar, isso em condições favoráveis quando os feixes da luz solar se mantêm perpendiculares à superfície (SANTOS, 2012). Adaptados para refletir na forma de um concentrador solar, quando equipados a um motor stirling a câmara de expansão onde será aquecido o fluido de trabalho fica alocado no foco da parábola, onde é concentrada toda radiação térmica, que por sua vez, gera energia mecânica para o funcionamento de um gerador elétrico (CONTAR, 2008).

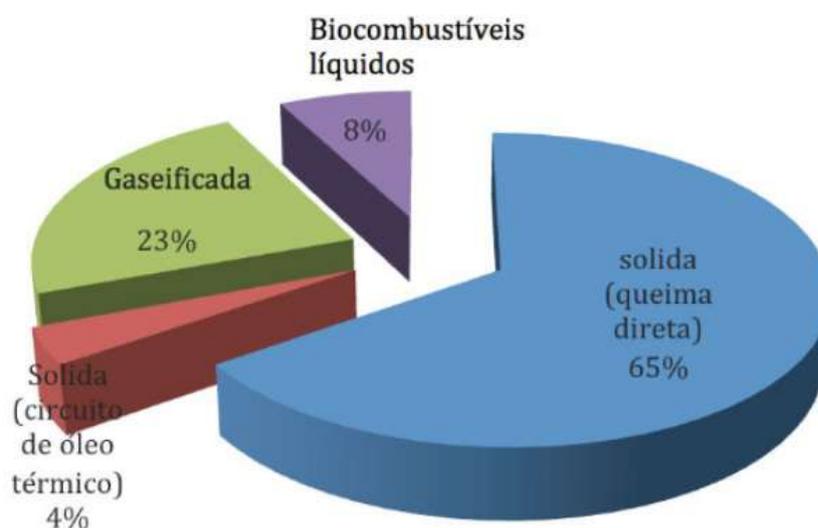
**Figura 19** - Motor Stirling equipado a um concentrador solar



**Fonte:** www.stirlingenergy.com

Os primeiros motores stirling que tiveram certa notoriedade na indústria a utilizarem de biomassa sólida como madeira, serragem e resíduos de biomassa vegetal foi o modelo ST-5, desenvolvido pela Stirling Technology. Tal máquina foi capaz de produzir cerca de 3,5 KW de potência, mantendo a eficiência de 45%. Os problemas até então na combustão de tais materiais se encontravam no acúmulo de resíduos na estrutura do motor, dificultando a troca de calor com o fluido de trabalho, assim, biocombustíveis líquidos também são amplamente utilizados, no entanto, demandam de mais recursos para serem produzidos como o biodiesel, se mantendo em maior escala de consumo os sólidos (figura 20) (MEDINA, 2017).

**Figura 20** - Percentual de Biocombustíveis utilizados na indústria de motores Stirling



**Fonte:** Medina ( 2017).

Além do biodiesel, outro foco de produção de biocombustíveis líquidos se encontra em relação ao etanol, tendo como matéria prima tanto a cana de açúcar quanto o milho. Só em 2018, o Brasil foi capaz de exportar cerca de 1,134 bilhão de litros de etanol, correspondendo a apenas 4% da sua produção (VIDAL, 2019). Enquanto ao que foi produzido de biodiesel só em 2020, o Brasil chegou a marca de 6.432.008  $m^3$  em apenas um ano (ANP, 2021).

A partir de testes com um modelo alpha equipados para consumirem biodiesel, foi possível alcançar uma eficiência térmica de 77,5%, chegando a produzir no máximo 3kW de energia elétrica (ALIABADI, et al, 2009; MEDINA, 2017). Levando em consideração sua estrutura, e o fácil acesso às suas fontes de combustível, como as sólidas ou líquidas, o motor stirling se torna conveniente como um microgerador residencial.

Apesar das fontes convencionais de energia, a versatilidade em um motor a combustão externa permite aplicações até mesmo em tecnologias espaciais utilizando como fonte de calor processos a níveis atômicos. A anos a nasa tem testado a tecnologia stirling como

geradores de energia elétrica, isso, a partir da energia térmica liberada por radioisótopos, apresentando um modelo com um desempenho com incríveis 14 anos de operação, fato relevante para aplicações em missões espaciais (SANDS, 2020).

**Figura 21** - Motor stirling alimentado por radioisótopos



**Fonte:** nasa.gov (2020).

Sendo uma máquina térmica com um número bastante elevado de fontes de combustível, tendo até mesmo componentes simples como a queima de lascas de madeira que geralmente são utilizados em fogueiras, partindo de uma situação casual, a produção de eletricidade se torna mais abrangente e diversificada com o advento do motor Stirling. Tornando assim, a produção de eletricidade um trabalho também casual, ainda mais se comparado a sua simplicidade.

Em meio às diversificações de modelos, a nível residencial o motor stirling vem sendo amplamente utilizado em sistemas CHP, ou seja, Produção combinada de Calor e Eletricidade. Sua função é unir os aspectos incluídos entre aquecedores e meios viáveis de um microgerador. Podendo ser acionado com o uso de qualquer biocombustível, um motor com 8 cilindros é capaz de produzir até 75 kW de potência, utilizando parte do calor desperdiçado no aquecimento de água da casa (PAULA, 2007). O sistema se torna bastante eficaz principalmente em tempos de seca, quando se é acionado o racionamento de energia elétrica fornecido por hidrelétricas.

Sistemas de cogeração elétrica tem feito parte de muitas propriedades agropecuárias desde a comercialização de biodigestores. Ao ser depositado material orgânico em uma solução aquosa de forma que a mistura esteja ausente de ar, ocorre um processo denominado de digestão anaeróbica, dessa forma a decomposição em biodigestores é capaz de produzir biogás, sendo em sua grande maioria o metano (DEGANUTTI, et al. 2002). Por se tratar de um gás inflamável, seu uso é bastante utilizado em máquinas de combustão interna para produção de energia elétrica, ou como gás de cozinha. Em cidades que são adequadas ao uso de aterros sanitários, a produção de metano também é possível, mas nesse caso limitada. Assim, a inclusão de um motor Stirling em qualquer sistema como máquina de geração de trabalho só é requisitada quando o tempo de operação supera os intervalos de manutenção, ou é buscado mais eficiência em um número consideravelmente alto de acesso a combustíveis.

### 3.6 Produção e controle de energia elétrica: Indução

Michael Faraday é considerado um dos Físicos experimentais mais brilhantes da história, e o responsável por estudos empíricos que nos permite atualmente produzir eletricidade em grande escala. Segundo Rocha (2002) tendo que deixar os estudos para ajudar a família, Faraday passa a trabalhar como entregador de jornal, e mais tarde com encadernação de livros tendo assim acesso a inúmeros exemplares da qual pode estudar nas horas vagas. Impressionado com as suas anotações feitas a partir das conferências de Sir Humphry Davy, o próprio cientista e palestrante o nomeia como assistente de laboratório na The Royal Institution.

Em meio ao século XIX, muitos cientistas buscaram maneiras de produzir eletricidade a partir de forças magnéticas, isso pois, já fazia parte do conhecimento da comunidade científica a capacidade de magnetizar um prego enrolando com fios de cobre e permitindo que correntes elétricas o atravessassem. Em laboratório ao prender um solenóide nos terminais de um galvanômetro, Faraday tem então a ideia de atravessá-lo com um ímã permanente cilíndrico, e como resultado é detectado uma corrente elétrica, que por sua vez, ocorre o mesmo processo caso mantenha o ímã estático enquanto movimenta o solenóide. Assim, em 1831 surgem as primeiras evidências da indução magnética, fazendo com que Michael Faraday viesse a criar conceitos de linhas e tubos de força, que atualmente são conhecidos como fluxo de campo magnético (ROCHA, 2002).

Mantendo fixo o campo magnético e deslocando uma espira delimitada por um circuito C, surgirá uma corrente elétrica no circuito fechado, pois, por conta da velocidade  $\vec{V}$  em um dado deslocamento  $d\vec{l}$  surgem forças de interação entre o campo magnético e os elétrons livres no interior do fio que constitui a espira (NUSSENZVEIG, 2018). Sendo expressa segundo *Lorentz*, como:

$$\vec{F} = -e\vec{V} \times \vec{B} \quad (3)$$

Como há uma força eletromotriz que gera trabalho suficiente para produzir corrente elétrica, tal campo no interior de um condutor que forma um circuito C não se apresenta de forma eletrostática, logo a força pode ser escrita como:

$$\vec{F} = -e\vec{E} \quad (4)$$

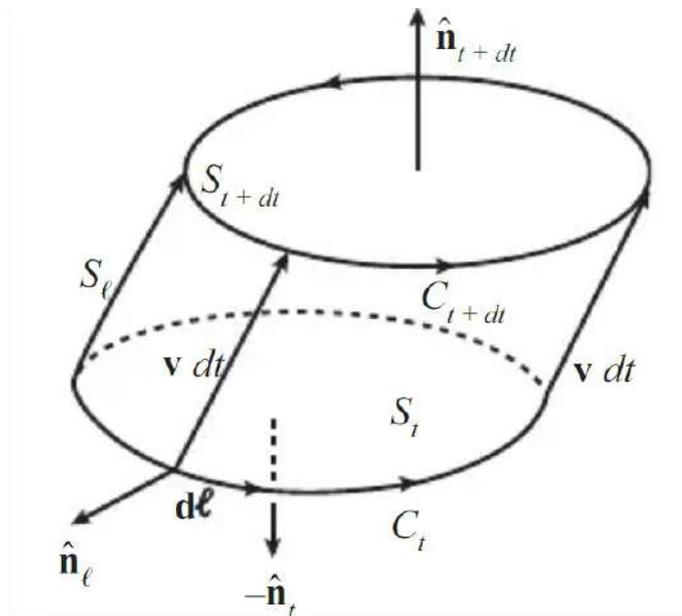
$$\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B} \quad (4.1)$$

Sendo a força eletromotriz a soma do campo elétrico que se estende no interior do fio a cada componente infinitesimal  $d\vec{l}$ , logo:

$$\varepsilon = \oint_C \vec{E}d\vec{l} = \oint_C d\vec{l}(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (5)$$

A partir do circuito C em movimento, tal que a cada intervalo de tempo  $dt$  a espira se desloca  $\vec{v}dt$ , é formado uma superfície ds equivalente a um cilindro que pode ser descrito como sendo o produto vetorial na equação 4.1.

**Figura 22** - Espaço cilíndrico formado pelo deslocamento de uma espira, indo de  $C_t$  a  $C_{t+dt}$



**Fonte:** Nussenzveig (2018)

Somando toda a superfície S do cilindro e analisando o fluxo magnético em todo o espaço percorrido pela espira, temos:

$$\hat{n}_t dS = d\vec{l} \times \vec{V} dt = d\vec{S}_t \quad (5.1)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 = \int_{S_{t+dt}} \vec{B} \cdot \hat{n}_{t+dt} dS + \int_{S_t} \vec{B} \cdot -\hat{n}_t dS + \int_{S_t} \vec{B} \cdot d\vec{S}_t \quad (5.2)$$

Aplicando a equação 5.1 em 5.2, e substituindo os fluxos de campo magnético por  $\phi$ , levando em consideração o sinal do verso  $\hat{n}$  externo a área S, reorganizando temos:

$$dt \oint_C (d\vec{l} \times \vec{V}) \cdot \vec{B} = -(\Phi_{C_{t+dt}} - \Phi_{C_t}) = -d\Phi_C$$

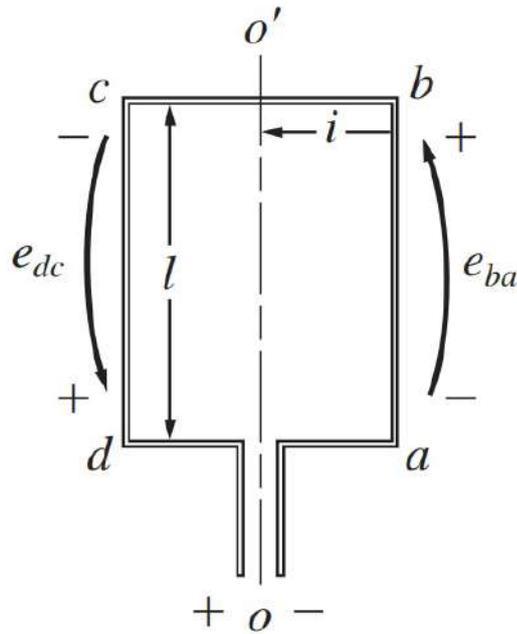
$$(d\vec{l} \times \vec{V}) \cdot \vec{B} = d\vec{l} \cdot (\vec{B} \times \vec{V}) = d\vec{l} \cdot \vec{E}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \varepsilon = -\frac{d\Phi_C}{dt} \quad (6)$$

Uma força eletromotriz só é induzida no interior de um fio condutor quando há de certa forma uma variação do campo magnético em meio ao circuito. Neste caso, sua variação é reproduzida com o deslocamento do condutor, onde a equação 5 defini tal fato como sendo a forma integral da *Lei de Faraday* (MACHADO, 2013). A interpretação do fenômeno Físico de forma matemática só foi formulada por Maxwell, sendo ela representada em sua forma diferencial, cabendo a Faraday o trabalho experimental.

Se tratando de geradores de corrente contínua (CC), o processo de produção de corrente elétrica é basicamente o mesmo, com a diferença em que a espira se desloca de forma circular. A partir da figura 23, a espira se encontra alocada em volta de um rotor de eixo que se estende de o para o' em meio a dois ímãs permanentes (figura 24). Ao deslocar a espira uma força eletromotriz  $\epsilon_{ba}$  é induzida, podendo ser expressa com o produto escalar da equação 4.1 pelo comprimento  $\vec{l}$  da espira.

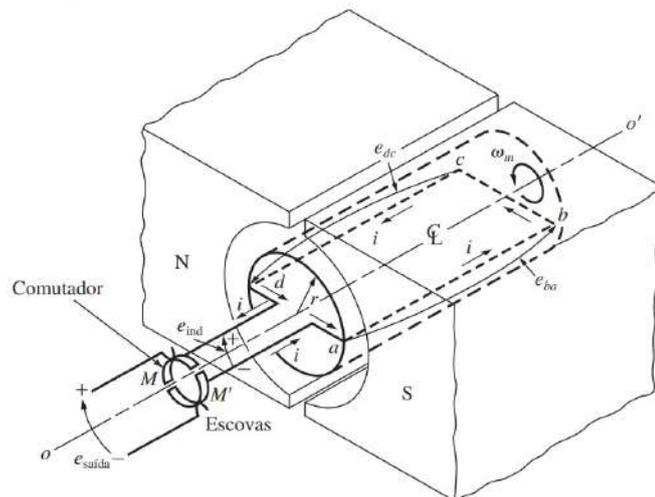
**Figura 23** - Espira de eixo oo'



Fonte: Chapman 2013

O mesmo ocorre produzindo uma corrente elétrica real no sentido  $cd$ , no entanto, sendo os segmentos  $cb$  e  $da$  radiais ao eixo do rotor, o produto vetorial  $\vec{V} \times \vec{B}$  sempre será perpendicular a reta que descreve o diâmetro do rotor, sendo assim a tensão igual a zero em tais regiões. A cada meia volta da espira, cada lado troca de polaridade na região em que atua o campo magnético de forma alternada mudando constantemente o sentido da tensão, mas mantendo o seu valor em módulo. Para se produzir uma corrente contínua, nos terminais da espira são instalados dois semi círculos condutores ( comutador ) em contato de forma mecânica com os terminais de uma carga (escovas). No momento em que a tensão chega a zero, os contatos entram em curto - circuito permitindo o fluxo de corrente elétrica em apenas uma direção (CHAPMAN, 2013).

Figura 24 - Modelo simples de um motor cc



**Fonte:** Chapman 2013

Aplicando um número alto de espiras reproduzindo assim uma bobina, de forma que todas estejam ligadas de forma intercaladas em segmentos circulares que é constituído o comutador, a corrente elétrica deixa de ser pulsada e passa a ter um aspecto constante no tempo.

### 3.7 Controle de tensão por modulação PWM

Quando se trabalha com geradores de corrente elétrica, muitas vezes o nível de potência ou tensão que são produzidos dependerão das características atribuídas a tal equipamento para sua operação. No caso de um motor Stirling, se utilizados biocombustíveis sólidos, o desempenho da máquina dependerá da quantidade de material que entra em combustão, que por sua vez, refletirá no nível de produção energético. Analisando o inverso de tal situação, é possível dimensionar os níveis energéticos máximos produzidos por uma máquina, dessa forma, a partir de equipamentos que adequem os níveis de tensão, potência e correntes elétricas, se torna possível suprir as necessidades requeridas em seu consumo.

Para isso, em produções limitadas de tensão elétrica, por exemplo, pode ser utilizado um conversor Buck, diminuindo o fluxo de potência de saída da qual deseja a partir de equipamentos eletrônicos. A premissa básica de um conversor CC-CC se trata de um circuito chaveado equipado a um filtro passa baixa LC. Controlando os intervalos em que tal chave estará aberta e fechada, é possível controlar a tensão de saída, sendo para esse projeto o uso de um MOSFET como chave (RASHID, 2015).

Na tentativa de se ter um conversor abaixador de tensão (conversor Buck) que opere de forma estável, é necessário a construção de um circuito em que a média da corrente no indutor, que ocorre nos processos de chave aberta e fechada, deve ser zero (HART, 2012). Trabalhando com uma corrente elétrica pulsada, mas, que ainda se mantém com valores positivos, pode - se chegar na seguinte expressão:

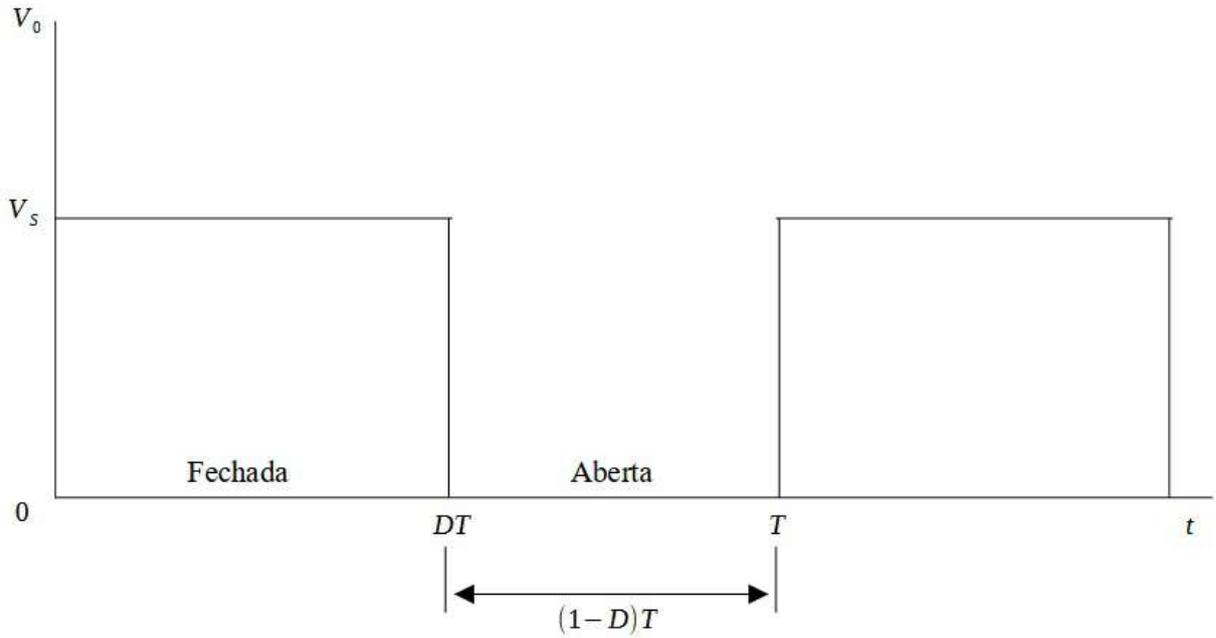
Chave fechada:

$$V_L = V_S - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S - V_o}{L} \quad (7.1)$$

$$(\Delta i_L)_{fechada} = \left( \frac{V_S - V_o}{L} \right) DT \quad (7.2)$$

**Figura 25** - Tensão elétrica registrada em um período de chaveamento



**Fonte:** Hart (2012) - Adaptado pelo autor.

Onde  $D$  é a taxa de trabalho no chaveamento (também conhecida como razão cíclica) e  $T$  é o período a cada pulso (HART, 2012):

$$D \equiv \frac{t_{ligado}}{t_{ligado} + t_{desligado}} = \frac{t_{ligado}}{T} \quad (8)$$

Analisando a tensão que percorre o sistema a cada pulso que pode ser variada ao interferir na razão cíclica do chaveamento, o que se é encontrado é uma onda quadrada (Figura 25).

Chave aberta:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_o}{L} \quad (9.1)$$

$$(\Delta i_L)_{aberta} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (9.2)$$

Com a chave fechada a corrente elétrica que percorre o indutor cresce de forma linear, no entanto, se a frequência de operação da razão cíclica for tal que o tempo de abertura da chave seja pequeno o suficiente para que ainda se tenha corrente em trânsito pelo indutor, é dito que o sistema opera em modo contínuo (HART, 2012).

$$(\Delta i_L)_{fechada} + (\Delta i_L)_{aberta} = 0 \quad (10)$$

$$\left(\frac{V_S - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T = 0 \quad (10.1)$$

$$V_o = DV_S \quad (11)$$

A partir da análise da corrente que percorre o indutor, chegamos a conclusão que a tensão de saída  $V_o$  será diretamente proporcional ao produto entre a razão cíclica  $D$  e a tensão de entrada  $V_S$ . Nesse sentido, como  $D$  é interpretado por pulsos na corrente elétrica que podem variar a partir de microcontroladores ligados ao seu sistema de chaveamento, tal mecanismo é denominado como modulação por largura de pulso (PWM -Pulse Width Modulation).

Em microcontroladores como o arduino que utiliza de programação computacional no controle de sensores ou automação de circuitos elétricos, seu sistema é equipado com uma saída analógica PWM, no entanto há certas limitações. O sinal PWM de um arduino é capaz de alcançar cerca de 980 Hz de frequência a partir da operação estabelecida por seus desenvolvedores, podendo chegar milhares de Hertz manipulando os dados processados com programação. A comunidade que trabalha com tal microcontrolador desenvolve programas destacados como softwares livres, sendo assim, produzido conteúdo de acesso gratuito a todos como meios de se manipular a frequência de operação do sinal PWM por exemplo. Os pulsos são manipulados usando um potenciômetro adequado, que por sua vez, pode ser usado no controle de chaveamento de outros dispositivos possibilitando a manipulação de tensões de fontes externas.

### 3.8 Modelagem isotérmica de SCHMIDT

Em primeira análise, para se ter em mãos um modelo matemático do qual fosse capaz de descrever os processos termodinâmica em um motor stirling, Gustav Schmidt parte do princípio em que; O fluido de trabalho é considerado ideal e mantém sua massa constante, que por sua vez nos espaços de compressão e expansão sua temperatura permanece de forma invariável. Assim, a pressão instantânea surge inicialmente a partir de uma suposição isotérmica ideal, dividindo um modelo de configuração alfa em cinco componentes

onde cada um possui sua respectiva massa do fluido de trabalho (URIELI, 2022). Sendo eles:

$m_c$  - massa do espaço de compressão,  $m_k$  - massa do refrigerador,  $m_r$  - massa do regenerador,  $m_h$  - massa do aquecedor,  $m_e$  - massa do espaço de expansão. Aplicando tal definição na equação dos gases ideais, obtemos:

$$P = MR / \left( \frac{V_C}{T_K} + \frac{V_K}{T_K} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h V_e}{T_h T_h} \right) \quad (12)$$

Para uma análise mais realista do problema, Gustav Schmidt publica em 1871 no Instituto Politécnico Alemão de Praga as equações que descrevem de forma senoidal as variações dos volumes dos espaços de compressão  $V_C$  e expansão  $V_E$  descritas em função de ângulo  $x$  percorrido em um ciclo eo ângulo de fase entre os dois pistões  $dx$  (HIRATA, 1997).

As equações modeladas para motor stirling tipo gama, assim como para as de mais configurações da máquina térmica, descrevem os volumes estântaneos  $V_E$  - de expansão,  $V_C$  - compressão de forma periódica. Sendo elas variadas em função dos volumes varridos pelos pistões de expansão  $V_{SE}$  e compressão  $V_{SC}$ , mantendo - se também constante os volumes mortos,  $V_{DE}$  (volume morto de expansão) e  $V_{DC}$  (volume morto de compressão) (HIRATA, 1997).

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + V_{DE} \quad (13)$$

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos (x - dx)) + V_{DC} \quad (14)$$

Volume total instantâneo, sendo  $V_R$  igual a zero na ausência de um regenerador.

$$V = V_E + V_R + V_C$$

Pressão interna do fluido de trabalho:

$$P = \frac{P_{mdia} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos (x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos (x - a)} = \frac{P_{max} (1 - c)}{1 - c \cdot \cos (x - a)} \quad (15)$$

Para plotagem de um diagrama P-V a partir dos parâmetros estabelecidos ou medidos

em um motor stirling, é necessário ter em mãos os coeficientes  $\mathbf{c}$  e  $\mathbf{a}$  calculados da seguinte forma:

$$t = \frac{T_C}{T_E}$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}}$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}}$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}}$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (15.1)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cdot \cos dx + v^2} \quad (15.2)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (15.3)$$

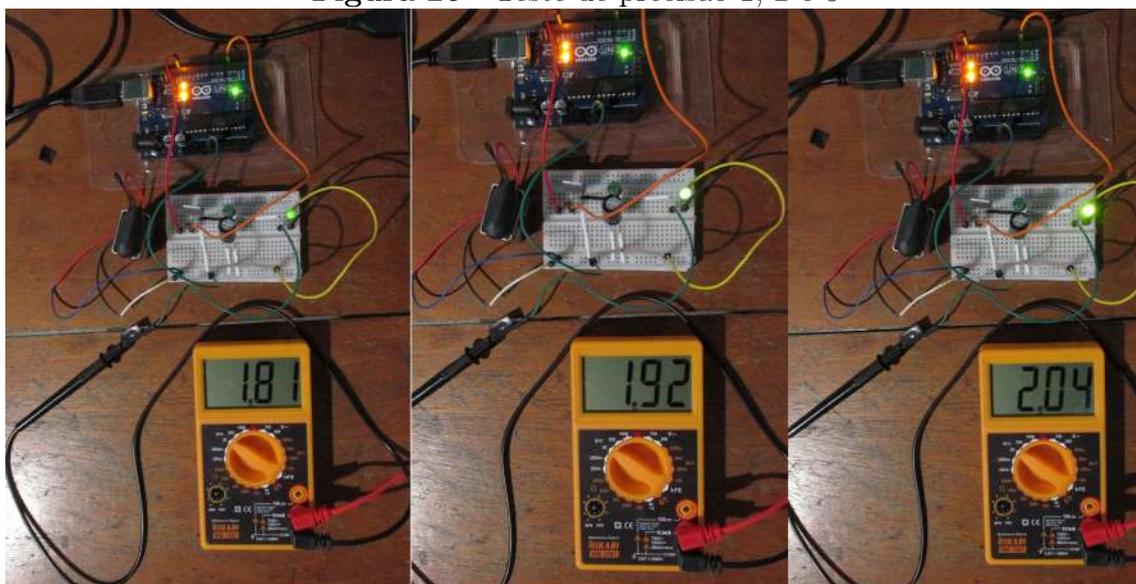
Vale ressaltar que apesar haver uma dependência da pressão interna em relação a pressão máxima -  $P_{max}$ , pressão média -  $P_{mdia}$  e pressão mínima -  $P_{mnima}$  apresentadas na equação 15, essas demais grandezas são calculadas como bem demonstra Hirata (1997).

## 4 Análise e Discussão de Dados

Como a finalidade da produção experimental se trata do controle de tensão elétrica a partir de geradores de corrente contínua, os testes iniciais do sistema Buck foram realizados com uma bateria 9 volts. Verificando o nível da tensão elétrica previamente com o multímetro, averiguamos a leitura de aproximadamente 7,77 volts, chegando a aproximadamente 7,1 volts quando ligados ao sistema PWM, isso devido os materiais não serem ideais.

Quanto a manipulação da tensão de saída a partir do monitor serial proveniente do arduino, encontramos uma precisão de uma casa decimal apresentando oscilações na segunda casa após a vírgula registradas no multímetro, como demonstrado na figura 26. A precisão é satisfatória visto que não há manifestações macroscópicas de tal oscilação, como piscar um led.

**Figura 26** - Teste de precisão 1, 2 e 3



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Para se ter uma variação de aproximadamente 0,1 volts na tensão de saída, foram digitados no monitor serial do arduino números como 1.1 - 1.2 - 1.3 - 1.4, seguindo a sequência até o número 2. Isso apresentado só tem efeito quando o gate do MOSFET é ligado a um resistor de pull-down e em seguida é aterrado, pois, há o acúmulo de cargas espúrias mesmo que desligue a tensão do gate.

Já a máquina stirling, o modelo alfa construído é capaz de estabilizar o rpm (rotação por minuto) em períodos que variam de acordo com o tempo de operação. Ligado a um motor elétrico de 5 volts, foi capaz de produzir uma tensão máxima de 3 volts chegando a oscilar nos primeiros momentos de operação em valores entre 2,5 v a 1,4 v. No entanto, ligado ao sistema Buck, graças ao filtro passa - baixa após um longo período de operação

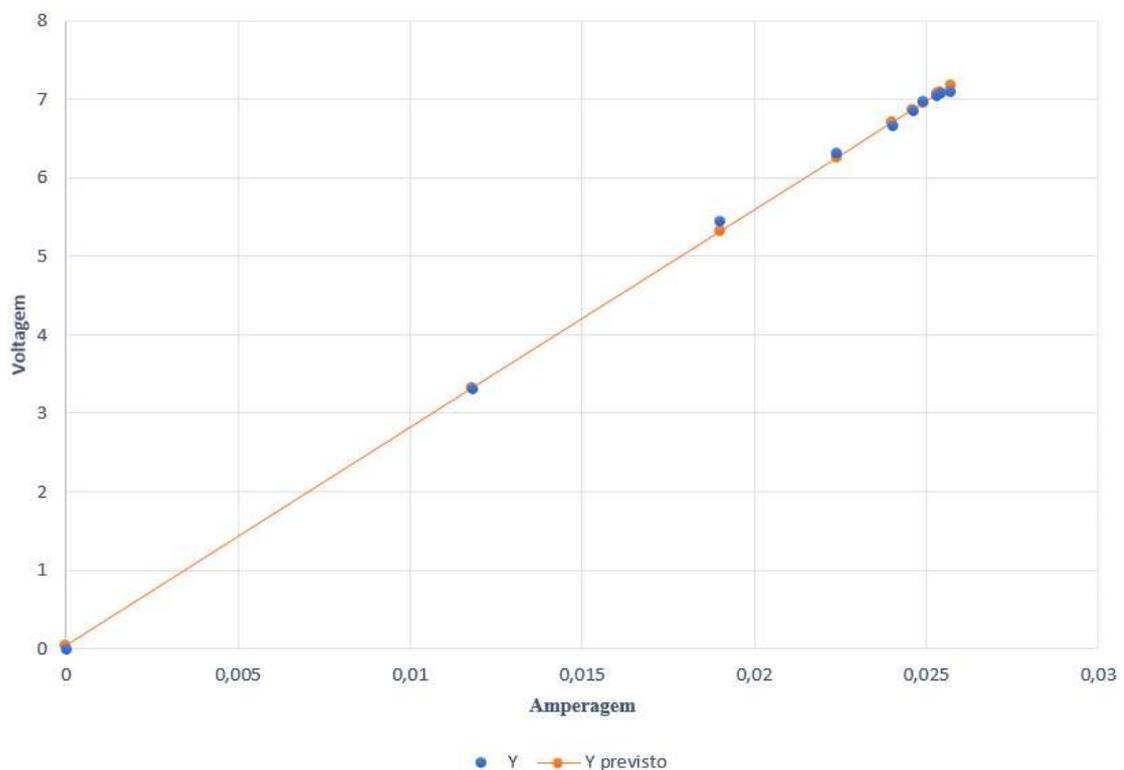
o sistema tende a se estabilizar apresentando os mesmos efeitos descritos quando testado a bateria de 9v.

Apesar da finalidade do sistema controlado por sinais PWM está até mesmo na literatura científica centrada em expor o controle da tensão elétrica, a corrente elétrica também é manipulada ao chavear o MOSFET com o arduino. Contrário da corrente alternada, onde o aumento da tensão elétrica produz uma queda da corrente, no experimento realizado com corrente contínua, tensão e corrente elétrica se mostram diretamente proporcionais, seguindo a primeira lei de ohm.

$$U = R \cdot I \quad (16)$$

Se analisado o que ocorre no procedimento experimental com perspectiva na equação (16), isso é justificado a partir do **gráfico -1**.

**Gráfico 1** - Variação da tensão elétrica em função da corrente



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Aplicando o teste em um resistor de aproximadamente 250 ohms, verificamos tal proporcionalidade à medida que aumentamos a tensão elétrica com o arduino, chegando assim, a uma variação que pode ser visualizada como uma regressão linear. No entanto, é

apresentando um acréscimo de aproximadamente 20 ohms, que é obtido através do valor médio dos resultados quando dividimos a tensão pela amperagem.

O sistema buck controlado por arduino apresenta precisão e estabilidade suficientes para aplicações elétricas principalmente quando ligados a um motor elétrico. Assim, o sistema neste caso funciona de forma satisfatória como uma espécie de manipulação digital do rpm (rotação por minuto), mesmo com a presença de oscilações em torno de 0,5 mA a 0,6 mA da corrente elétrica.

## 5 Conclusão

Como bem demonstra o capítulo de termodinâmica, por haver uma relação direta entre calor e trabalho em máquinas térmicas isso se mostrou um problema para os materiais utilizados no motor stirling de modelo alfa. Como foram utilizados conectores de fio elétrico na produção do pistão que é alocado na câmara de expansão, o aumento de temperatura provocado pela fonte quente após um certo período de tempo dilata os conectores de cobre afrouxando os parafusos e desmontando a peça, interrompendo de forma imediata a produção de trabalho mecânico.

Para o uso do protótipo como um meio de produção de energia residencial, mesmo que para pequenas demandas é necessário rever algumas peças. Analisando a tecnologia digital por trás da manipulação da tensão elétrica, ela corresponde às expectativas sendo uma surpresa o nível de precisão do controle de corrente elétrica. Mesmo com um funcionamento satisfatório do sistema Buck o capacitor utilizado deve ser escolhido com cautela. Capacitores eletrolíticos, como o que foi usado no experimento, apresenta baixo desempenho, tendo um acúmulo indesejável de cargas elétricas mesmo quando desligado o PWM, assim, mantendo em algumas vezes o fornecimento de tensão elétrica em vez de uma descarga gradual quando desligado da fonte.

E não menos importante, como foi destacado a oscilação da tensão elétrica no capítulo anterior, deve - se ressaltar que tal estabilidade depende diretamente dos componentes utilizados como indutor, capacitor e da frequência de chaveamento. Logo, tais peças devem ser escolhidas de acordo com a carga da qual irá receber a tensão elétrica manipulada.

Outro ponto a ser destacado é quanto a manutenção dos níveis de temperatura da câmara de expansão. Como não foi usado um regenerador térmico, o motor stirling se manteve operante em um longo período somente com o resfriamento à base de água da conexão entre a câmara de expansão e compressão. Portanto, por ser um protótipo experimental, o método de manipulação elétrica se mostrou viável mesmo que utilizado material reciclável, em contrapartida sendo necessário revisar quanto a qualidade dos materiais para motor stirling.

Apesar de tais eventuais problemas o motor stirling é de fato uma máquina útil como gerador de energia mecânica a ser consumida para produção de energia elétrica. Respondendo às hipóteses apresentadas no início do trabalho, por ser uma máquina térmica de combustão externa, o modelo alfa apresentado tem certas vantagens por se tornar operante até mesmo a partir de energia residual, logo, cabendo apenas a criatividade humana em diversificar as formas de fonte calor, como já apresentado nos capítulos anteriores.

Sendo assim, tecnologia e potência existem; levando em consideração as condições das quais foram montadas o experimento, isso a partir de sucata, a produção de 3 volts supera as expectativas ainda mais se levado em consideração a potência do gerador usado e das dimensões da máquina Stirling. E não menos importante, o sistema PWM manipulado via

arduino é um mecanismo viável, pois o nível de energia dissipada na manipulação de tensão é baixa, chegando a um acréscimo de aproximadamente 12% do esperado e analisando o gráfico 1. Portanto, analisando os níveis de manipulação e estabilidade alcançados com o arduino, essa ferramenta e o motor Stirling são equipamentos que valem a pena serem implementados.

## 6 Referências

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br>>. Acesso em: 10, jan, 2022.

CAMARGO, Sabina et. al. Brincadeiras que educam I: O "pássaro bebedor" e a Física das máquinas térmicas. Arquivos da APADEC. Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Física, Maringá, Paraná. Brasil, 2001 Vol. 5 Núm. 1 Ene-Jun, Pág. 41-43.

BARROS, R. Avaliação teórica e experimental do motor Stirling Solo 161 operando com diferentes combustíveis. Universidade Federal de Itajubá, 2005.

CONTAR, I. B. Desenvolvimento de um motor Stirling acoplado a uma placa parabólica coletora de energia solar. Universidade São Francisco, Campinas - SP. Dez. 2008.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. **AMGH**, 5<sup>a</sup>. ed. 2013.

DEGANUTTI, R; PALHACI, M. C. J. P; ROSSI, M; TAVARES, R; SANTOS, C. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. An. 4. Enc. Energ. Meio Rural 2002.

GASPAR, Alberto. Compreendendo a Física - Ondas, óptica e termodinâmica. 2°. ed. São Paulo: Ática, 2013.

HART, D. W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. **AMGH**. 2012.

HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK R. Fundamentos de Física. Vol. 2 - Gravitação, ondas e termodinâmica, 10<sup>a</sup> edição. **LTC**, Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HIRATA, k. SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES. jan, 1997.

MACHADO, K. D. Eletromagnetismo. **Todapalavra**. vol. 3. 2014

MARTINI, W. R. Stirling engine desing manual. Martini Engineering Publication, 1983.

MÁXIMO, Antônio; ALVARENGA, Beatriz; GUIMARÃES, Carla. Física, contextos aplicações. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Scipione, 2016.

MEDINA, J. R. V. Motor Stirling: Uma alternativa para a geração de eletricidade a partir da biomassa. **Programa Editorial** Universidad Autónoma de Occident.2017.

NUSSENZVEIG, H. M. Física Básica 3: Eletromagnetismo. **Blcher**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo. 2015.

O Ciclo de Carnot. **E-escola - Instituto Superior Técnico**. Disponível em: <<http://e-escola.tecnico.ulisboa.pt/topico.asp?id=577>>. Acesso em: 06, jan, 2022.

OLIVEIRA, A. P. M; FUNGANHOLI, N.S; CUNHA, P. H. S; BARELLI, V. A; BUNEL, M. P. M; NOVAZZI, L. F. Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis. Centro Universitário FEI. Vol. 04 N. 2018.

OMANÃ, D. Estudio teórico del regenerador para un motor Stirling. Tesis maestría en ciencias en ingeniería mecánica. Mexico: Instituto Politécnico Nacional, 2007.

PAULA, R. B. PROJETO E AVALIAÇÃO TEORICA E EXPERIMENTAL DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA UTILIZANDO MOTORES STIRLING. **UNIFEI**, Itajubá, Dez. 2007.

PASSOS, J. C. Carnot e a Segunda Lei da Termodinâmica. **Revista de Ensino de Engenharia**. v. 22, n° 01, p. 25-31, 2003.

RASHID, M. H. Eletrônica de potência: Circuitos, dispositivos e aplicações. **Pearson**. 4<sup>a</sup>. ed. set. 2015.

ROCHA, J. F. Origens e evolução das idéias da física. **EDUFBA**. Salvador. 2011.

RODRIGUES, N. D. R. P. Sistema de Microgeração de Energia com Base num Motor Stirling. **ISEL**. Lisboa, jun. 2017.

SANTOS, M. R. C. Estudo de um sistema de cogeração com motor Stirling e concentrador solar. **FEUP**. jan. 2012.

SANDS, K. Conversor Stirling define marco de operação contínua de 14 anos. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/glenn/2020/stirling-converter-sets-14-year-continuous-operation-milestone>> Acesso em: 18, jan, 2022.

SENF, J. An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines. 1<sup>a</sup>. ed. jan. 1996.

SIER, R. A Biography of the Inventor of the Heat Economiser and Stirling Cycle Engine. **L.A.MAIR**, dez. 1995.

SUNPOWER. Califórnia, EUA. Disponível em:<<https://www.sunpowerinc.com/about-sunpower/history>>. Acesso em: 19, jan, 2022.

URIELI, I. Stirling Cycle Machine Analysis. **OHIO - UNIVERSITY**. EUA. 2020. Disponível em: <<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/>>. Acesso em: 17, jan, 2022.

VIDAL, M. F. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. **ETENE** N<sup>o</sup> 79. maio. 2019.

WALKER, G; SENFT, J. R. Free Piston Stirling Engines. **Springer, Berlim, Heidelberg**. 1985.

WIKIPÉDIA.Thomas Savery. Disponível em:<<https://bit.ly/3zagzjd>>. Acesso em: 12, jul, 2022.

ZARCO, M. A. MÁQUINAS: MOTORES TÉRMICOS. Disponível em:<<https://bit.ly/3BhBZho>>. Acesso em: 12, jul, 2022.



Centro de Ciências Sociais e Educação  
Curso de Licenciatura em Física  
Rua Mato Grosso, 137 – Setor Alto Paraná  
68550-000 – Redenção – PA  
[www.uepa.br](http://www.uepa.br)

