



Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
CECAU - Colegiado do Curso de  
Engenharia de Controle e Automação



João Marcelo Pedra Lopes

## **O motor Stirling: passado e presente**

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2023

João Marcelo Pedra Lopes

## **O motor Stirling: passado e presente**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira(o) de Controle e Automação.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Profa. Dra. Adrielle de Carvalho Santana.  
Coorientador: Prof. Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L864o Lopes, Joao Marcelo Pedra.  
O motor Stirling: passado e presente. [manuscrito] / Joao Marcelo  
Pedra Lopes. - 2022.  
34 f.: il.: color., gráf..

Orientadora: Profa. Dra. Adrielle de Carvalho Santana.  
Coorientador: Prof. Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola  
de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Motores - Motor Stirling. 2. Geração Distribuída. 3. Cogeração. 4.  
Robert Stirling. I. Santana, Adrielle de Carvalho. II. Tonidandel, Danny  
Augusto Vieira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E  
AUTOMACAO



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**João Marcelo Pedra Lopes**

**O Motor Stirling: Passado e Presente**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 22 de Dezembro de 2022

Membros da banca

Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Orientadora (DECAT - Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel - Coorientador (DECAT - Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Convidado (DECAT - Universidade Federal de Ouro Preto)  
M.Sc. Fernando dos Santos Alves Fernandes - Convidado (DECAT - Universidade Federal de Ouro Preto)

Adrielle de Carvalho Santana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Adrielle de Carvalho Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/12/2022, às 20:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0449344** e o código CRC **87D75BDD**.

# Agradecimentos

Agradeço a todos os que acreditaram em mim e que se dispuseram a estar comigo durante essa jornada.

Aos meus pais, Maronita e João, que sempre acreditaram que a educação é o único caminho de se trilhar pelo mundo.

Às minhas irmãs Núbia e Camila, pelo apoio, palavras de carinho, momentos de cumplicidade e também por se mostrarem sempre presentes comigo.

Aos Professores Dra. Adrielle e Dr. Danny, por acreditarem nesse projeto e me ajudarem a construí-lo.

À minha gloriosa República Bangalô, por estar comigo nos momentos mais difíceis e me apoiar até o final.

*“May the Force be with you.” (Obi Wan Kenobi)*

# Resumo

O presente trabalho relata um estudo sobre o motor de Stirling de 1816 e apresenta um pouco da história do seu criador, Robert Stirling, e toda sua obra. É realizado um levantamento de arquivos históricos, objetivando avaliar as possíveis aplicações, vantagens e desvantagens do motor. Os estudos avaliaram a época, situação e estado da história no momento da criação e registro da patente do mesmo, buscando entender no passado a possível solução para a problemática de geração de energia em locais remotos no presente. Visando entender a viabilidade do Motor Stirling para tais fins, percebe-se que o mesmo, devido aos seus aspectos de construção, pode ser utilizado das mais diversas maneiras e com os mais diversos combustíveis. Portanto, pode-se concluir que o Motor Stirling pode surgir como uma alternativa a contribuir com a Geração de Energia Distribuída no Brasil, principalmente entregando a lugares remotos uma alternativa de fonte complementar de energia elétrica ou força motriz. Além disso, apresenta uma alta versatilidade quanto aos combustíveis que podem ser utilizados, incluindo fontes sustentáveis, tais como, biomassa e painéis fotovoltaicos.

**Palavras-chave:** Motor Stirling. Geração Distribuída. Cogeração. Robert Stirling.

# Abstract

The present work reports a study on the Stirling engine of 1816 and presents a little of the history of its creator, Robert Stirling, and all his work. A survey of historical archives is carried out, aiming to evaluate the possible applications, advantages and disadvantages of the engine. The studies evaluated the time, situation and state of history at the time of patent creation and registration, seeking to understand in the past the possible solution to the problem of power generation in remote locations nowadays. In order to understand the viability of the Stirling Engine for such purposes, it is evident that, even with its construction aspects, it can be used in the most diverse ways and with the most diverse fuels. Therefore, it can be concluded that the Stirling Engine can emerge as an alternative to contribute to the Distributed Energy Generation in Brazil, mainly by delivering to remote places an alternative source of complementary electric energy or driving force. Besides that presents a high versatility regarding the fuels that can be used, including sustainable sources such as biomass and photovoltaic panels.

**Key-words:** Stirling engine. Distributed generation. Cogeneration. Robert Stirling.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Histórico da geração de energia elétrica no Brasil. . . . .	13
Figura 2 – Robert Stirling. . . . .	18
Figura 3 – Lapide Robert Stirling. . . . .	19
Figura 4 – Patente Motor Stirling . . . . .	20
Figura 5 – Ciclo Stirling Real e Ideal . . . . .	24
Figura 6 – Princípio de funcionamento motor tipo alfa . . . . .	25
Figura 7 – Motor Beta, Gama e Alfa . . . . .	26
Figura 8 – Motor patenteado por Robert Stirling (1816) . . . . .	26
Figura 9 – Funcionamento de um motor do tipo Beta . . . . .	27
Figura 10 – Motor tipo Gama . . . . .	27
Figura 11 – Funcionamento Motor tipo Gama . . . . .	28
Figura 12 – Motor tipo Alfa . . . . .	29
Figura 13 – Anuncio Rider Ericsson Engines . . . . .	30

# Lista de abreviaturas e siglas

GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
HP	Horse Power
W	Watt
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>13</b>
1.2.1	Objetivos Gerais	13
1.2.2	Objetivos Específicos	14
<b>1.3</b>	<b>Organização e estrutura</b>	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>14</b>
1.4.1	Classificação	14
1.4.2	Estratégia da Pesquisa	14
1.4.3	Locais de Busca de Referências	15
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>História das máquinas térmicas</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>O motor Stirling</b>	<b>18</b>
2.2.1	Robert Stirling	18
2.2.2	Patente do motor stirling	19
2.2.3	Desenvolvimento dos Motores Stirling	21
<b>2.3</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>	<b>22</b>
2.3.1	Componentes	22
2.3.2	Funcionamento	23
2.3.3	Configurações	25
2.3.3.1	Beta	26
2.3.3.2	Gama	27
2.3.3.3	Alfa	28
<b>2.4</b>	<b>Aplicações</b>	<b>29</b>
2.4.1	Bombeamento de água	29
2.4.2	Produção de energia elétrica	30
<b>3</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>32</b>
	<b>Referências</b>	<b>33</b>

<b>ANEXOS</b>	<b>35</b>
<b>ANEXO A – THE ENGINEER 1917 . . . . .</b>	<b>36</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O recurso energético sempre foi um dos grandes aliados do desenvolvimento humano, desde a descoberta do fogo à geração de eletricidade, este sempre possibilitou o uso de diversas tecnologias para o bem-estar humano. Segundo [Welty, Clark e Simms \(2009\)](#), o fornecimento de energia elétrica na faixa menor que 100 kWh em áreas remotas se dá, na maioria das vezes, por basicamente 5 limitadas maneiras: (1) Micro-hidrelétrica, (2) Turbina Eólica, (3) Energia Solar Fotovoltaica, (4) Geradores a base de combustíveis fósseis e (5) micro-turbinas à base de metano.

As soluções que normalmente vêm sendo adotadas para o abastecimento energético brasileiro são fortemente baseadas na Geração Centralizada (GC) de Energia, ou seja, a criação de obras de grande porte para geração e transmissão de energia. Porém, a Geração Distribuída (GD), onde a energia é produzida de forma competitiva próxima à unidade consumidora, também chamada de co-geração, independente da sua fonte ou potência de geração, é uma alternativa que vem se destacando nos últimos anos, como sendo uma opção viável e aceitável para auxiliar na demanda energética do país. Com seus devidos ajustes de produção, meio e oportunidade, a co-geração já chega a corresponder a mais de 20% da matriz energética de alguns países mais desenvolvidos ([PAULA, 2007](#)).

Como a GD se encontra localizada próxima à unidade consumidora, ela pode ser vista como uma reserva de potência junto a essas cargas, aumentando assim, a confiabilidade e estabilidade do suprimento energético. A maioria dos consumidores ainda depende da GC para o seu abastecimento. A GD surge como uma oportunidade, não de competição, mas sim de complemento do fornecimento da GC ([PAULA, 2007](#)).

Como bem discorrido por [Schimid \(2014\)](#) existe um crescimento desproporcional relacionando ao crescimento em PIB e a necessidade energética do Brasil nos últimos anos, sendo cada vez mais importante e necessária a criação de novas fontes energéticas. Segundo [Lampis et al. \(2022\)](#), no ano de 2006 a produção energética por meio de hidrelétrica era de mais de 80% da produção nacional e segundo o mesmo autor, no ano de 2019 já se tinha reduzido essa porcentagem para pouco mais de 60%, como mostrado na Figura 1, evidenciando um grande crescimento das outras fontes de produção na matriz energética brasileira.

O primeiro motor a realizar trabalho útil segundo o ciclo Stirling, processo termodinâmico de quatro etapas internamente reversíveis em série, foi a máquina criada por Robert Stirling em 1816, que recebeu posteriormente o mesmo nome que seu criador,

sendo um motor de combustão externa e com uma ampla gama de combustíveis. Sendo assim pode-se utilizar do mesmo para a geração de energia elétrica e aproveitar-se das diversas possibilidades de combustíveis para alimentação, sendo inclusive a energia solar uma delas (WILKE; LORA, 2004).

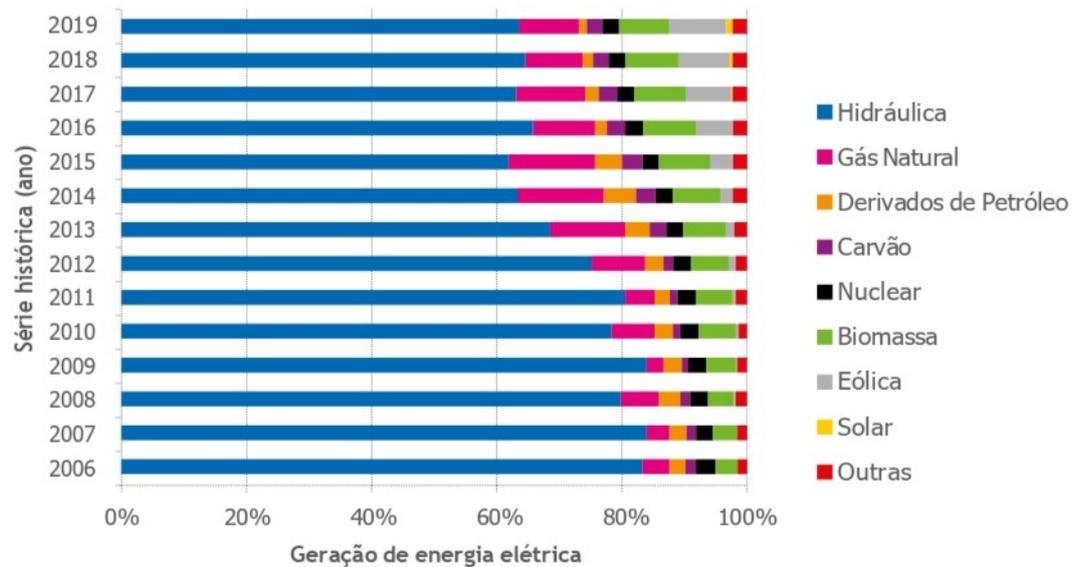


Figura 1 – Histórico da geração de energia elétrica, em porcentagem, no Brasil por fonte energética. Fonte: (LAMPIS et al., 2022).

Portanto, observando todos os fatos e dados apresentados, propõe-se que novas fontes de Geração Distribuída são de extrema importância para o desenvolvimento econômico brasileiro, portanto, uma alternativa que possibilita o uso de diversos tipos de combustíveis, incluindo a energia solar, se torna alvo de grande interesse, podendo ser um importante complemento para geração de energia em lugares remotos, ou um serviço de energia complementar, ajudando o usuário a diminuir a parcela de energia consumida do sistema nacional distribuído (PAULA, 2007).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Promover um estudo preliminar sobre a história e a utilização do motor Stirling, desde a sua origem até os dias atuais.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

- Produzir um texto acadêmico científico que propicie o entendimento histórico, econômico e social sobre o motor Stirling;
- Obter melhor compreensão sobre as aplicações positivas e negativas de sua utilização;
- Entender aspectos de rendimento, funcionamento e desenvolvimento do motor Stirling;

## 1.3 Organização e estrutura

No capítulo 1 foram apresentados a contextualização, objetivos e metodologia do trabalho. No capítulo 2 é feita a revisão da literatura sobre o tema, levantamento e apresentação dos dados e fatos. Por fim, no capítulo 3 é feita uma discussão da revisão feita, conclusões e sugestões encontradas.

## 1.4 Metodologia

### 1.4.1 Classificação

A presente pesquisa é classificada como uma pesquisa exploratória, objetivando levar o pesquisador a uma maior familiaridade dos conhecimentos sobre o tema e clarificar conceitos, trazendo no seu cerne de desenvolvimento a busca por documentos primários de pesquisa, como: dados históricos, documentos, patentes, documentos pessoais (diários, memórias, autobiografias, correspondências) entre outros, não deixando de utilizar fontes secundárias como fontes de conhecimento importantes para a formulação e entendimento do problema (MARCONI; LAKATOS, 2003).

### 1.4.2 Estratégia da Pesquisa

Dada a definição do objeto de estudo, foi feita uma breve pesquisa sobre a relevância e abrangência do tema, validando a hipótese de trabalho. Partindo desse ponto de análise a partir dos objetivos traçados, iniciou-se um processo de pesquisa de fontes primárias, com o levantamento de dados históricos relevantes<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ler mais sobre em [Al-Chueyr e Martins \(s.d.\)](#).

### 1.4.3 Locais de Busca de Referências

Foi utilizado o Google Acadêmico como uma fonte de pesquisa para o trabalho, sendo uma ferramenta de busca de artigos, livros, teses e monografias do Google. Foi utilizado também o portal de periódicos Capes, com o acesso disponível pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Alguns arquivos históricos não encontrados no Google acadêmico, foram retirados de páginas sobre história da ciência e artigos de livre acesso da Web.

## 2 Desenvolvimento

### 2.1 História das máquinas térmicas

Durante um grande período da História, não houve avanço industrial, ou de desenvolvimento econômico fortemente relevante, no que diz respeito a história industrial e desenvolvimentista. Segundo [Souza e Cruz Silva \(2021\)](#) até grande parte do século XVIII, as economias do mundo todo haviam sido agrárias e com foco artesanal.

Por volta do século XVIII, em uma Inglaterra inspirada por um processo de ascensão da burguesia e vantajosos acordos comerciais com Portugal, surge de forma natural uma necessidade de novos caminhos para a época e as pessoas. Com o controle do parlamento, a burguesia tinha poderes para dar início a uma era comercial e desenvolvimentista ([SILVA; ERROBIDART, 2019](#)).

Tendo em vista a crescente atividade industrial, surge uma grande necessidade de matéria-prima para a matriz energética, e o carvão vegetal, até então abundante, passa a se tornar uma fonte escassa e, por esta razão, de alto valor, para a indústria. Uma das estratégias consideradas pelo Império Britânico para solucionar o problema foi aumentar a exploração de carvão mineral. Considerando-se o acúmulo de matéria orgânica ao longo de milhões de anos, seria uma opção viável e acessível. Entretanto, as perfurações em busca de carvão tinham como resultado frequente a chegada no nível do mar, o que provocava constantes inundações, haja vista que as escavações atingiam os lençóis freáticos.

Diante da necessidade de controlar os alagamentos e os altos custos, surge então uma corrida; com o objetivo de produzir e patentear máquinas à vapor, como bombas e motores que produzissem mais lucros e otimizassem os resultados da recém iniciada revolução.

A primeira ideia de máquina a vapor relatada chamada de eolípila, criada por Heron de Alexandria, no século I, consistia basicamente de uma caldeira de água, que após aquecida, soltava vapor em seus orifícios, criando um impulso e fazendo-a girar. A eolípila não conseguia produzir nenhum trabalho útil, e nenhum estudo científico foi formalizado a respeito deste instrumento ([WOODCROFT, 1851](#)).

Em 1698, o engenheiro militar inglês Thomas Savery (1650-1715) criou uma máquina a vapor que levava o seu nome e poderia ser utilizada dentro das fábricas, porém, devido a seus aspectos de construção, a máquina de Savery apresentava falhas contínuas. A necessidade de uma forma mais eficiente de bombear água era cada vez mais latente e conseguir tal feito, era, nesse momento, sinônimo de voluptuosos resultados financeiros ([SILVA; ERROBIDART, 2019](#)).

Reproduzir a máquina de Savery não era só difícil, era caro. A patente conseguida pelo militar inglês impedia em muito a sua reprodução. Porém, em 1712, o construtor Thomas Newcomen (1664-1729) conseguiu reproduzir e melhorar o projeto antes apresentado. Sua grande influência como pregador da Igreja Batista lhe concedera uma grande rede de contatos e, por consequência, a oportunidade de financiamentos para a produção de um motor térmico que pudesse ser utilizado dentro das minas de carvão, tanto para elevar cargas de água, quanto outras cargas na mina. Tratava-se de uma alternativa mais lenta, porém era mais eficiente e menos dispendiosa que os cavalos anteriormente utilizados (SOUZA; CRUZ SILVA, 2021).

Até este momento da história, a maioria dos construtores e inventores trabalhava com conhecimentos empíricos e não se baseavam em estudos acadêmicos para as suas criações. Até aqui não é dada importância para o fenômeno físico empregado, de modo que, em um dado momento, só o conhecimento técnico já não é, por si só, capaz de desenvolver e ampliar as descobertas e inovações que a época se propunha. A academia que já demonstrava interesse em resolver e ampliar os horizontes do problema, começa a figurar um papel fundamental com os estudos de alguns dos seus pesquisadores. Um deles em especial, James Watt (1736-1819), era responsável por consertar os equipamentos usados pelos professores nas aulas de engenharia, e foi aí que Watt começou a estudar sobre o motor de Newcomen.

As ideias de Watt permeavam também os caminhos teóricos sobre o calor e sobre o estudo da caloria. Isso permitiu que ele se afastasse do ramo técnico e se permitisse a pensar além das estruturas já existentes. Com isso ele sugeriu a utilização de cobre, um melhor condutor, no lugar do ferro, sugeriu também aumentar a área exposta do cilindro para condensação e assim, proporcionalmente, melhorar o processo de resfriamento. Porém, ele percebeu ser impossível manter o cilindro sempre aquecido. É aqui que a proposta de adicionar um segundo cilindro, um que trabalhasse frio, favorecendo a condensação e o resfriamento, lhe concede a patente de uma nova máquina à vapor (1769), dessa vez cinco vezes mais eficiente que a máquina de Newcomen e com um consumo 75% menor (SILVA; ERROBIDART, 2019).

Um motor de ciclo fechado representa uma característica muito interessante, onde o mesmo fluido aquecido, em uma parte, pode ser simultaneamente resfriado em outra. A criação de Robert Stirling em 1816 veio para trazer novos parâmetros para a ciência da época, sendo tão revolucionário que até mesmo 30 anos depois a sociedade ainda não havia entendido por completo a invenção de Stirling (BARROS et al., 2005).

## 2.2 O motor Stirling

### 2.2.1 Robert Stirling

Robert Stirling, mostrado na figura 2, nasceu em Gloag, Methvin Perthshire, Escócia no dia 25 de outubro de 1790. Trata-se daquele que iria vir a se tornar o criador do motor Stirling em 1816. Sendo o terceiro de oito irmãos, sempre foi muito dedicado à ciência e foi um brilhante aluno na Universidade de Edinburgh, de 1805 a 1808. Mais tarde matriculou-se no curso de teologia da Universidade de Glasgow, vindo a se formar em 1815 e sendo ordenado no ano seguinte (DARLINGTON; STRONG, 2005).



Figura 2 – Robert Stirling em seus últimos anos. Fonte: (DARLINGTON; STRONG, 2005).

Sempre teve muito interesse por engenharia e desde cedo já auxiliava na empresa da família. Em 1816, após vários anos de trabalho com seu irmão James Stirling, ele dá entrada na patente “Improvements for Diminishing the Consumption of Fuel, and in Particular an Engine Capable of Being Applied to the Moving (of) Machinery on a Principle Entirely New”– Melhora para Redução do Consumo de Combustível, e em Particular um Motor Capaz de ser Aplicado ao Movimento de Máquina com um princípio Completamente Novo, que viria a ser expedida no dia 20 de janeiro de 1817 (BARROS et al., 2005), (CACHUTÉ, 2006).

Em 1850, Robert Stirling tem o seu motor estudado por McQuorne Rankine e, cerca de 100 anos mais tarde, o termo “Motor Stirling” começa a ser utilizado por Rolf Meijer para descrever todos os motores a gás, com ciclo térmico fechado. Diante de tantas descobertas e utilizações das suas invenções, talvez aquela que tenha sido a mais importante; a da utilização de um dispositivo regenerador ou economizador, conseguindo assim, poupar energia e melhorar o processo de sistemas térmicos do seu motor e diversas outras

máquinas (CACHUTÉ, 2006).

Robert Stirling se muda para a Paróquia de Galston, em Ayrshire, em 1824, onde posteriormente iria patentear modificações importantes em seu motor. Serviu como ministro respeitado por 54 anos, no local onde criou seus filhos. Patrick, Willian, Robert e James se tornaram engenheiros ferroviários e o quinto filho, David, tornou-se ministro em Ayrshire. Robert Stirling morreu aos 88 anos e está enterrado no adro da paróquia de Galston, onde nasceu. Sua lápide, renovada em 2014, é mostrada na Figura 3 e tem o desenho da patente original do motor entalhada. Nesse mesmo ano, ele foi empossado no Salão da Fama da Engenharia Escocesa, se unindo a excelentes engenheiros como James Watt, Thomas Telford, J W Macquorn Rankine e físicos como Lord Kelvin e James Clerk Maxwell (REID, 2016).



Figura 3 – Lápide Robert Stirling inaugurada em 2014, no Adro da Paróquia de Galston. Fonte: (REID, 2016).

### 2.2.2 Patente do motor stirling

A patente de número 4081 de 1816, solicitada por Stirling (1816), não avaliava a concepção de um novo motor, mas sim o processo de melhoramento dos anteriores, porém, mais tarde, percebeu-se que se tratava de uma máquina completamente diferente e que devia ser vista como tal.

Aquilo que o Robert Stirling descreveu como “economizador” ou “regenerador”, viria a se tornar um avanço para as tecnologias dos motores a ar quente. O regenerador nada mais é que um componente que armazena calor de um ciclo para ser reutilizado no ciclo seguinte. Assim o gás aquecido flui pelo regenerador e acaba armazenando calor lá durante a sua ida para a zona fria. Quando o gás retorna, ele passa novamente pelo regenerador e assim é pré-aquecido antes de chegar na zona quente, portanto esse novo

dispositivo “economizador”, consegue gerar ganhos para o melhor aproveitamento do calor (ARSDALL, 2022).

Em sua patente, Stirling (1816) descreve a utilidade do uso do regenerador não só para o motor de ar, mas também para aplicações como fornos, com economia de combustível em cervejarias, destilarias, tinturarias e outras manufaturas.

Após explicar o funcionamento do dispositivo “economizador”, Stirling descreve o funcionamento do seu motor. Um grande diferencial é que o motor aqui descrito não necessitava de caldeira, portanto não há aquecimento de água e grandes pressões, gerando assim um dispositivo mais limpo e mais seguro em funcionamento (DARLINGTON; STRONG, 2005).

A publicação do jornal “The Engineer”, no anexo A, de 1917, celebra o centenário do registro da patente e traz pela primeira vez, em extenso, a explicação detalhada dos princípios de funcionamento do motor proposto por Stirling, onde, em detalhes, são descritos os princípios de funcionamento do regenerador e do motor Stirling original. Algumas imagens da patente são mostradas na Figura 4 a seguir (THE..., 1917).

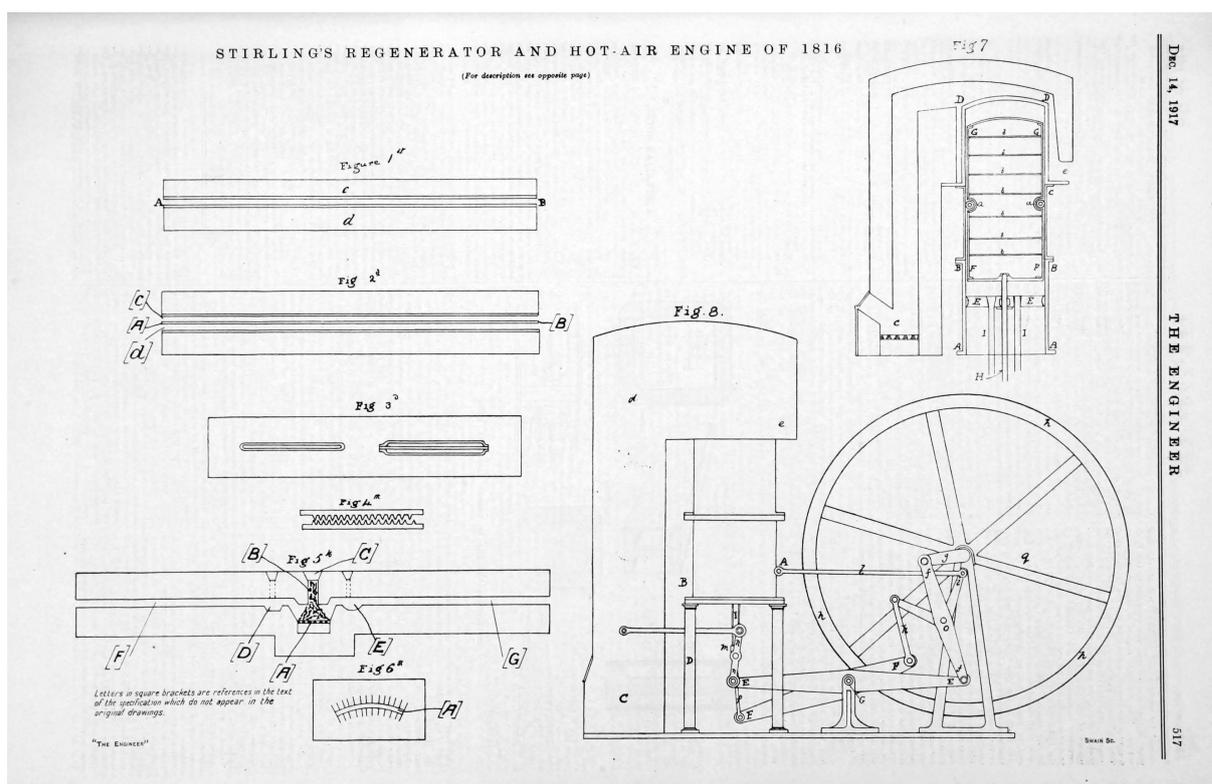


Figura 4 – Ilustrações da patente do motor Stirling publicadas no jornal The Engineer em 1917. Fonte: (THE..., 1917).

### 2.2.3 Desenvolvimento dos Motores Stirling

O primeiro motor desenvolvido a partir da patente foi criado em 1818 para bombear água de uma pedreira em Ayrshire, porém, por uma falha de manuseio do operador, houve um superaquecimento da superfície de aquecimento, e devido aos materiais inadequados usados na construção da máquina, isso resultou em uma inutilização do componente de aquecimento da mesma. Porém, essa máquina foi muito importante para se observar a necessidade de melhorias em aspectos construtivos, sendo o material da superfície de aquecimento um deles. Outro aspecto é que o motor não conseguia gerar um torque muito alto e isso, inicialmente, fez com que ele caísse em um certo desuso (MANBY et al., 1853).

Procurando romper a barreira de potência dos motores a ar, acreditava-se que era necessário a criação de uma máquina muito grande para se atender às potências esperadas, porém, em 1824, Robert percebeu que tais barreiras poderiam ser superadas trabalhando-se com ar de maior densidade. Isso envolveu a necessidade de um cilindro fechado, ou um motor de dupla ação, com dois vasos de ar, para que não houvesse saída do ar comprimido. Tais melhorias foram patenteados 1827, em conjunto com seu irmão James Stirling e em 1828, foi criado a primeiro motor com tais melhorias(MANBY et al., 1853).

O auge da produção dos motores Stirling aconteceu graças ao inventor sueco John Ericsson, ele obteve sucesso em produzir um motor prático e conseguiu vender aproximadamente 2000 unidades do mesmo, com potências entre 0,5 e 5 HP. Isso aconteceu por volta de 1850. Segundo Cachuté (2006) Ericsson também foi o primeiro a projetar e construir um motor Stirling movido a energia solar (BARROS et al., 2005).

O motor Stirling, apesar de ser revolucionário para a época, apresentava alguns desafios que muitas vezes impossibilitava a sua aplicação em algumas áreas. Segundo Duffett (2014), a máxima potência alcançada pelos motores a ar na época era cerca de 20 HP (14,914kW), enquanto motores a vapor conseguiam chegar a cerca de 100 HP (74,57kW). Outro ponto que afetava a utilização dos motores Stirling era a dificuldade para se produzir uma variação de velocidade, dificultando, por exemplo, sua utilização para a criação de um automóvel. Porém, a sua utilização era interessante para outras atividades, como retirar água de poços e outros serviços de bombeamento e, mais tarde, ainda no século XIX, utilizado para a produção de energia, pois apresentava pouco ruído, uma constância em sua velocidade e uma fácil operação.

No século XX os motores Stirling voltaram a ter um certo destaque. Nos anos 1930, quando pesquisadores da Philipis Company reconheceram várias possibilidades de uso deste motor, foram investidos milhões de dólares em pesquisa e desenvolvidos motores com bom funcionamento, silenciosos e com a possibilidade de utilizar qualquer fonte de calor. Nesta época a empresa estava interessada em produzir motores que pudessem auxiliar

a produção de energia elétrica para rádios ao redor do mundo, e as características dos motores Stirling permitiam isso (BARROS et al., 2005), (LEITE, 2018).

Nos últimos 50 anos foram desenvolvidos diversos outros motores Stirling, como motores que utilizam gases diferentes do ar, seja hidrogênio ou hélio, que apresentam um melhor resultado, mas, em contrapartida, requerem uma melhor vedação e cuidado com vazamentos. Outra aplicação conhecida surgiu da necessidade de produção de energia no espaço. Atualmente as conhecidas células solares são suficientes para fornecerem energia para a exploração espacial, porém, com a sondagem do espaço profundo, as células são insuficientes. É avaliada nesta situação outra forma de produção de energia, e aqui, o motor Stirling pode ser uma alternativa de produção de energia nuclear. O calor viria por meio do decaimento de um radioisótopo (isótopo radioativo de elemento natural, sujeito a decaimento radioativo), acionando um gerador de eletricidade. Outra perspectiva de pesquisa a ser aplicada no espaço é a utilização da diferença de temperatura do lado quente da embarcação e do lado frio (DUFFETT, 2014).

Muitas são, e foram, as utilizações dos motores a ar quente em geral, e também do motor Stirling em específico, mas é perceptível que o avanço da sua utilização para geração de eletricidade no século XXI mostra que existe nele um potencial enorme e que pode ser explorado pelos próximos anos (DUFFETT, 2014).

## 2.3 Princípio de funcionamento

### 2.3.1 Componentes

Os motores Stirling podem ser diversos e complexos de diferentes maneiras. Porém, os componentes empregados neles são parecidos. Segundo Wilke e Lora (2004) e Barros et al. (2005) os componentes necessários para um motor Stirling são:

- Fonte de Calor: Diversas são as fontes de calor que podem ser utilizadas pelo motor Stirling, como biomassa, energia solar, gás natural, biocombustível, combustíveis fósseis, energia nuclear, entre outros e é essa versatilidade que traz muitos benefícios para sua utilização. A fonte de calor é onde se gera calor para a nossa zona quente.
- Fluido de trabalho: Vários tipos de gases podem ser utilizados como fluido de trabalho, desde, ar atmosférico a gases como hélio e hidrogênio.
- Trocador de calor: É o item que compõe a zona quente e zona fria do motor. Fica responsável por aquecer e resfriar o fluido de trabalho, gerando compressão e expansão do gás.

- Regenerador: Item revolucionário patenteado por Stirling, é responsável por reter calor durante a passagem do fluido da zona quente para a zona fria e devolver esse calor quando o fluido volta.
- Pistão: Existem modelos de um ou dois pistões de acionamento. São ligados a um virabrequim ou um sistema de alavancas que determina o tempo de atuação ideal do motor.
- Deslocador: É um pistão especial, utilizado em motores do tipo Beta e Gama. Ele é responsável por mover o gás entre os trocadores de calor quente e frio.

### 2.3.2 Funcionamento

No final do século XVIII James Watt desenvolveu um “Diagrama Indicador” para conseguir determinar o quanto de trabalho é produzido por um motor. Esse diagrama é um gráfico de Pressão x Volume. Watt produziu o mesmo a partir de um engenhoso procedimento, um lápis preso ao manômetro conectado ao cilindro controlava o movimento vertical do desenho, e o movimento cíclico do pistão, proporcional ao volume, controlava o movimento horizontal do lápis. De acordo com cada ciclo produzia-se um laço, onde o trabalho produzido era proporcional à área do desenho. (REID, 2016).

O ciclo Stirling está baseado na equação fundamental dos gases perfeitos:

$$pV = nRT. \quad (2.1)$$

O ciclo do motor Stirling, atua conforme a lei geral dos gases mostrada na equação 2.1 relacionando: Pressão (p) e Volume (V) com Temperatura (T) e Número de moles (n), onde (R) é a constante dos gases. É dividido em duas zonas: Zona Quente e Zona Fria. Ocorre o deslocamento do fluido de trabalho por entre essas zonas ao longo dos ciclos de trabalho. O regenerador é o elemento que está entre essas zonas de trabalho objetivando absorver e ceder calor ao fluido conforme a etapas do ciclo vão ocorrendo (PAULA, 2007).

Para se entender o funcionamento dos motores Stirling, considere a Figura 5 representando em um gráfico PxV em um ciclo real e ideal. Parte-se da situação 1, onde todo o gás está na zona fria e o pistão fica na parte inferior. Quando o pistão passa da posição 1 para a 2, acontece uma compressão isotérmica a uma temperatura mais baixa  $T_c$ , neste processo é cedido ao exterior uma quantidade de calor  $Q_c$ , para a fonte fria.

$$Q_c = mRT_c \ln(V_{min}/V_{max}). \quad (2.2)$$

Agora com o pistão fixo, move-se o deslocador, forçando todo o gás para a zona quente, ao passar pelo regenerador o fluido de trabalho recebe uma quantidade de calor  $Q_{rg}$ , resultando em um processo isovolumétrico, com aumento de pressão, curva 2-3. A

curva 3-4 mostra uma expansão isotérmica, agora em alta temperatura  $T_h$  e durante esse processo é absorvido uma quantidade de calor  $Q_h$  da fonte quente.

$$Q_h = p dV = \left( \frac{nRT_h}{V} \right) dV = nRT_h \ln(V_{max}/V_{min}). \quad (2.3)$$

Finalizando o processo e movimento do deslocador para a posição inicial, acontece outro processo isovolumétrico que armazena energia  $Q_{rg}$  no regenerador, diminuindo a temperatura do gás.

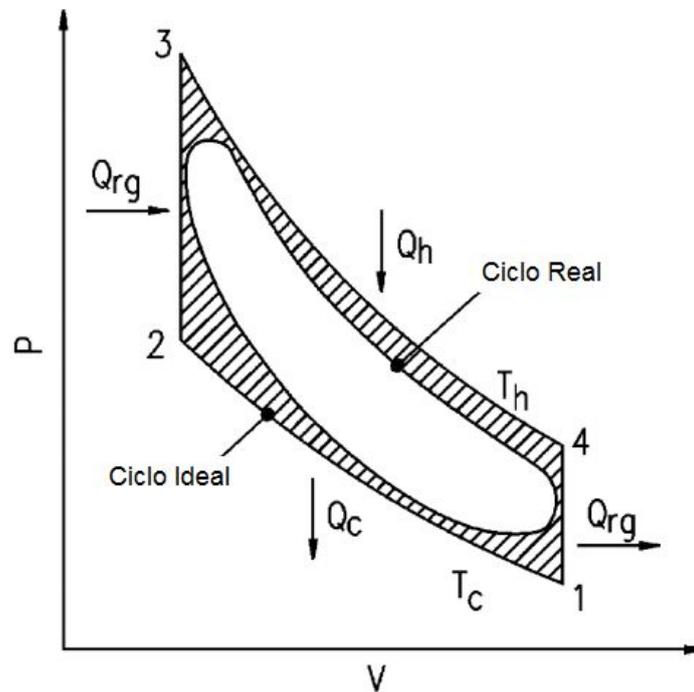


Figura 5 – Digrama indicador Pressão x Volume para um motor Stirling. Fonte: (CORRIA; COBAS; LORA, 2006)

A Figura 6 ilustra um esquema simplificado de um motor do tipo alfa, onde em relação à Figura 5 o processo se inicia na etapa 3, sendo essa, análoga à etapa 1 da figura anteriormente mostrada. Portanto, considerando a etapa 3 da Figura 6 como sendo a etapa 1 da Figura 5, tem-se uma descrição de funcionamento análoga.

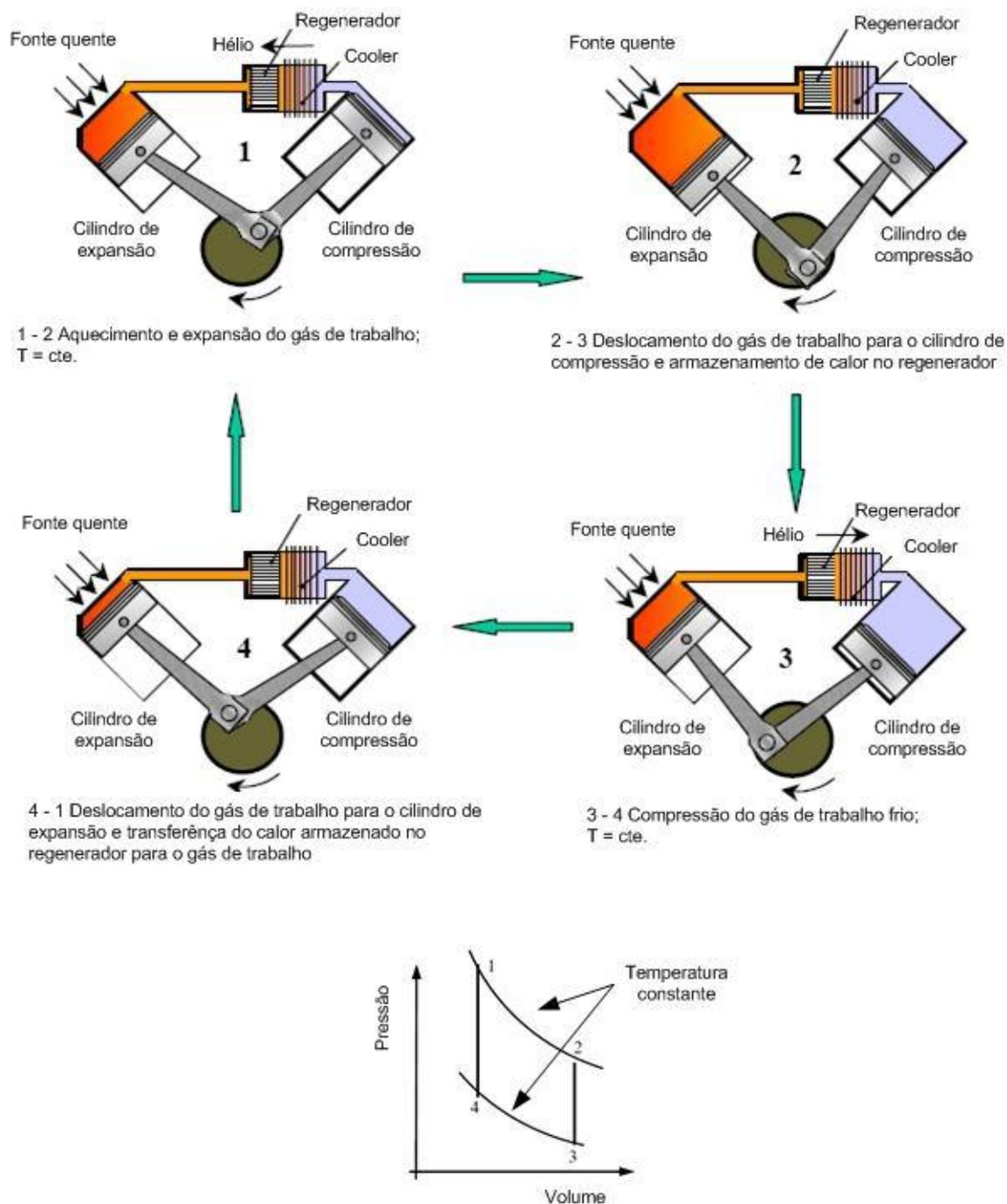


Figura 6 – Princípio de funcionamento motor tipo alfa. Fonte: (PAULA, 2007)

### 2.3.3 Configurações

Os motores Stirling podem ser classificados em três disposições. Alfa, Beta e Gama, conforme a disposição dos cilindros e pistões. Os exemplos clássicos destes são mostrados na Figura 7.

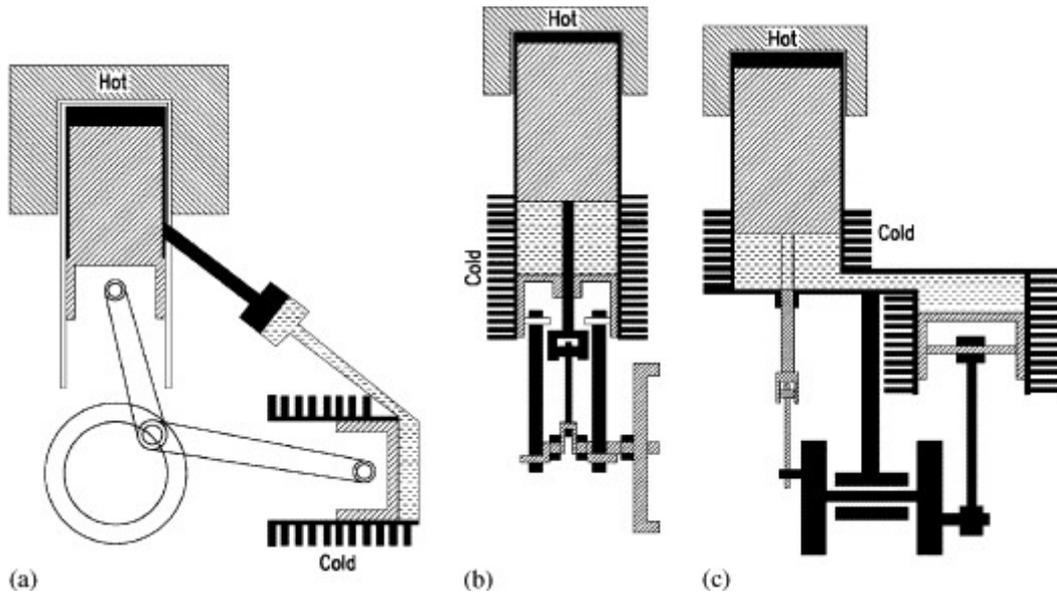


Figura 7 – (a) Motor do tipo Alfa, (b) Motor do tipo Beta e (c) Motor do tipo Gama.  
Fonte: (CORRIA; COBAS; LORA, 2006)

### 2.3.3.1 Beta

Na configuração do tipo beta, os deslocadores e o pistão estão alinhados dentro do mesmo cilindro. Devido a essa sobreposição dos pistões, uma maior taxa de compressão pode ser obtida, porém, devido ao fato das hastes do deslocador e do pistão estarem alinhadas, torna-se difícil a construção do motor (BARROS et al., 2005).

O motor do tipo beta é exatamente o modelo patenteado por Stirling (1816). A Figura 8, ilustra a ideia criada e patenteada por Stirling.

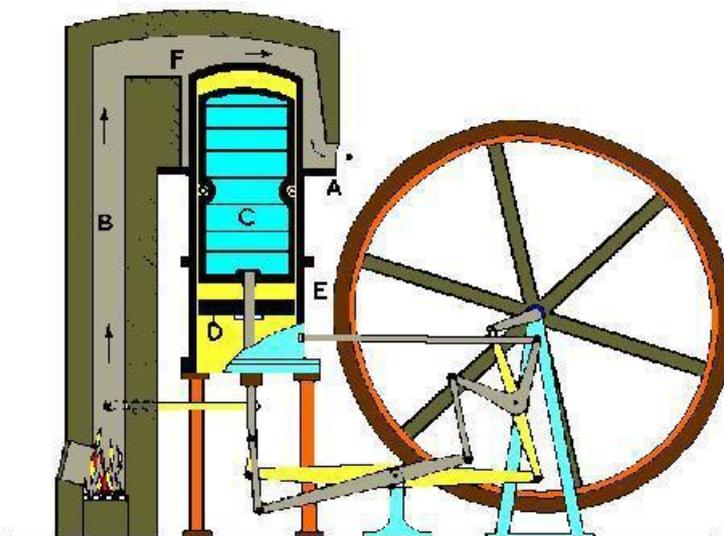


Figura 8 – Motor patenteado por Robert Stirling (1816). (BARROS et al., 2005).

A Figura 9 ilustra o princípio de funcionamento de um motor desse tipo. No passo (a)  $\rightarrow$  (b) o pistão do deslocador leva o fluido de trabalho do espaço frio para o espaço quente, aquecendo o mesmo e promovendo aumento de pressão, o que conseqüentemente gera produção de trabalho. No passo (c)  $\rightarrow$  (d) o fluido é deslocado para a zona fria onde o gás é comprimido, no passo (e)  $\rightarrow$  (b) o deslocador transfere novamente o gás para o espaço de expansão e reinicia o ciclo de trabalho (CRUZ et al., 2012).

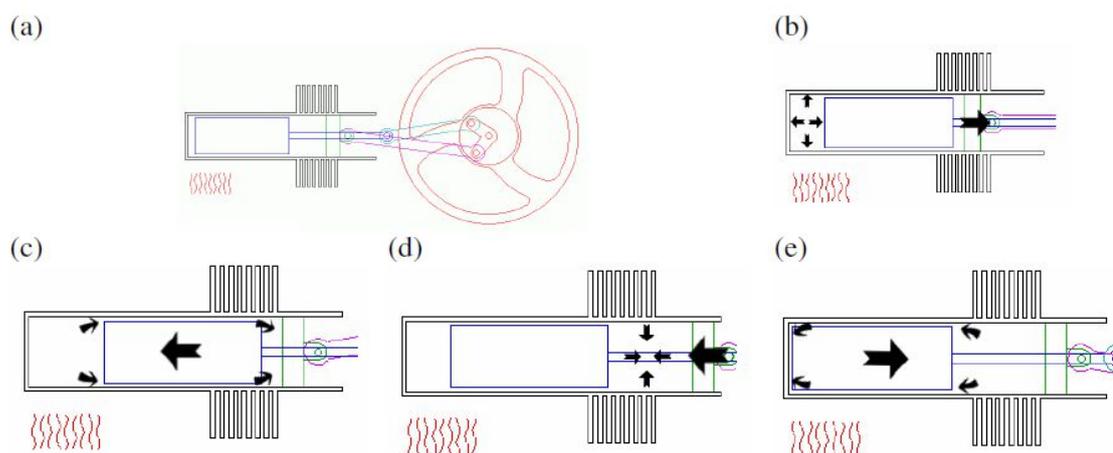


Figura 9 – Funcionamento de um motor do tipo Beta. Fonte (CRUZ et al., 2012).

### 2.3.3.2 Gama

O motor do tipo gama é uma variação da original invenção de Stirling. Tem um deslocador similar ao modelo Beta, porem esse é montado em outro cilindro. A configuração do tipo Gama tem a vantagem de *separar* a área de trabalho quente e o trocador de calor quente, que são associados ao pistão de compressão, do espaço de compressão associada ao pistão de trabalho, como se pode ver na Figura 10 (BARROS et al., 2005).

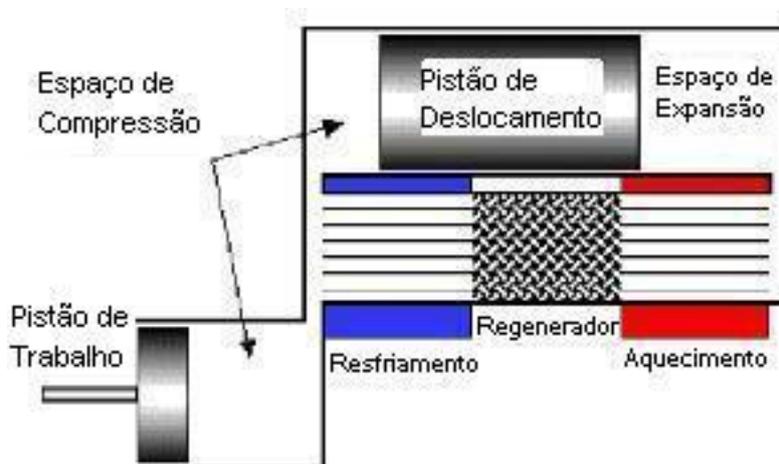


Figura 10 – Motor tipo Gama (BARROS et al., 2005)

Se comparado ao modelo Beta, ele possui um mecanismo mais simples de funcionamento. O ciclo de trabalho do motor tipo Gama apresentado na figura 11, pode ser descrito como sendo:

- 1-2 -> O pistão de trabalho é movimentado para cima, comprimindo o gás de trabalho isotermicamente, enquanto rejeita calor para o sistema de resfriamento.
- 2-3 -> Acontece um aquecimento isocórico do fluido. O pistão de deslocamento se movimenta para baixo, fazendo com que o gás passe para o espaço de expansão, recebendo calor da fonte externa e elevando a pressão.
- 3-4 -> Com o aumento da pressão, o pistão de trabalho se movimenta para baixo, realizando trabalho. É um processo isotérmico que durante a expansão o fluido recebe calor da fonte externa.
- 4-1 -> O pistão de deslocamento é deslocado para cima, nesse momento acontece uma rejeição de calor isovolumétrica. O fluido passa para o espaço de compressão rejeitando calor para o sistema de resfriamento.

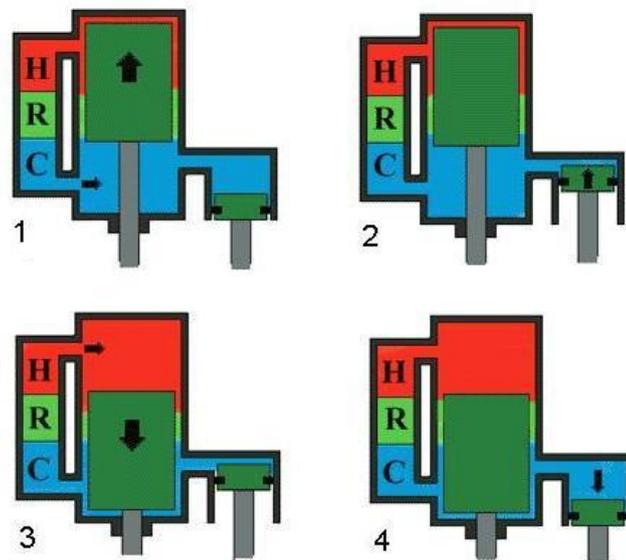


Figura 11 – Princípio de funcionamento de um motor tipo Gama de dois cilindros. Fonte: (BARROS et al., 2005).

### 2.3.3.3 Alfa

Trata-se de um modelo de motor de dois pistões, defasados de  $90^\circ$  um do outro, sendo um pistão de compressão e um pistão de expansão. Os dois pistões comprimem o fluido de trabalho no espaço frio, fazendo ele fluir para o espaço quente, onde é expandido e volta para o espaço frio (PAULA, 2007).

Mesmo tendo uma compreensão mais simples e de fácil entendimento, ele possui a desvantagem de que precisa que fluido de trabalho fique confinado dentro das câmaras de aquecimento e resfriamento. O motor do tipo alfa pode ser visto na figura 12 e o seu princípio de funcionamento e ciclo foram explicados nas imagens 6 e 5.

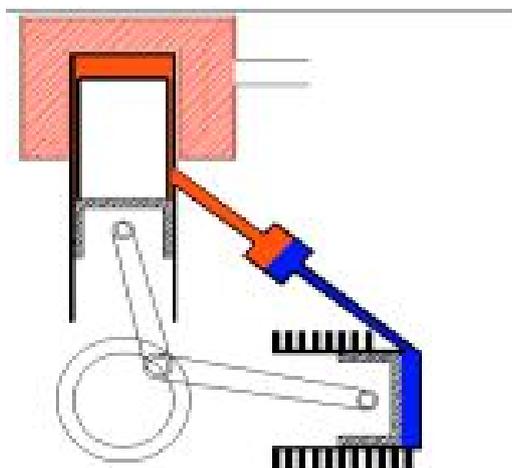


Figura 12 – Motor tipo alfa de dois pistões. Fonte: citepaula2007geracaoeletricidade.

## 2.4 Aplicações

### 2.4.1 Bombeamento de água

O Motor Stirling foi projetado inicialmente para o bombeamento de água. A Grã-Betanha do século XIX já iniciava o processo de água encanada, mas o mesmo ainda iria demorar a chegar em áreas mais afastadas. Nos Estados Unidos, com o “empurrão” para o oeste com as ferrovias, grandes ranchos muitas vezes não possuíam proximidade a fontes de água, e mesmo que tivessem as bombas movidas pela força do vento, às vezes não ventava. O cartaz representado na figura 13 mostra um anúncio da Rider Ericsson Engines, promovendo seu produto (DUFFETT, 2014).

Até os tempos atuais, ainda se tem a utilização do mesmo para bobear água. Costa e Silva (2018) discutem em seu texto a utilização de um motor do tipo Gama, com fonte de energia solar, para bombeamento de água. O motor apresentado possui, um rendimento de aproximadamente 25% e bombeamento estimado de 0,480 m<sup>3</sup>/dia, o que pode ser muito interessante para aplicações em épocas de estiagem, em certas regiões do Brasil.



Figura 13 – Anúncio Rider Ericsson Engines. Fonte: (DUFFETT, 2014).

#### 2.4.2 Produção de energia elétrica

Os motores a ar quente, de modo geral, se descobrem como muito interessantes para a produção de energia a partir da segunda metade do século XIX, Seu aspecto silencioso e aceleração controlada são pontos positivos e favoráveis aos mesmos. Foram muito utilizado em faróis, como o Lizard Lighthouse onde havia uma necessidade de produção de eletricidade para iluminação, em 1878. E eles possuíam dois motores a ar quente para alimentar suas lâmpadas a arco (DUFFETT, 2014).

Atualmente, a possibilidade de utilizar várias fontes de calor para o motor Stirling mostra o seu grande potencial para a geração de energia em locais remotos. Segundo Corria, Cobas e Lora (2006) pode-se utilizar a biomassa para a produção de eletricidade em locais remotos com facilidade. A possibilidade de acoplar um motor Stirling a um forno de Biomassa, ou a um biodigestor são muito atrativos.

Outra fonte de calor que pode ser interessante para o motor Stirling é a energia

solar. [Mendoza \(2012\)](#) em seu trabalho, traz diversas vantagens da produção de energia elétrica por meio do conjunto Disco/Stirling, onde um disco parabólico concentra os feixes de calor e assim aumenta a eficiência da utilização do motor.

Uma das grandes vantagens dos motores Stirling é o seu silencioso funcionamento, e isso acabou chamando a atenção dos engenheiros navais suecos, para seus submarinos furtivos. O empreiteiro da defesa, Kockums, acabou por desenvolver unidades de 100HP (74,57kW), que ficavam responsáveis por fornecer energia auxiliar à embarcação, prolongando o tempo operacional do submarino, se comparado a utilização somente de baterias. Outra utilização que surge é a produção de energia elétrica em iates de luxo, onde alguns dos seus passageiros não querem ser incomodados pelo som do motor a diesel. O motor Stirling pode ser uma ótima alternativa silenciosa aqui ([DUFFETT, 2014](#)).

## 3 Conclusões

A genialidade do trabalho de Robert Stirling é espantosa até mesmo para os dias atuais. Ele traz em seu invento muito daquilo que vivia em sua realidade, um conhecimento quase que empírico de engenharia e um evidente desejo de inovar.

A Europa do início do Século XIX passava por diversos problemas sociais e econômicos e uma revolução industrial avassaladora que levou a diversas descobertas que mudaram para sempre a história. A contribuição de Stirling mostra até mesmo uma certa preocupação com relação a acidentes e eventuais explosões. Ter isso em vista, em um período onde o trabalho infantil e altas horas de trabalho eram solicitadas é muito importante para entender o trabalho de Stirling.

É interessante perceber que o dispositivo, originalmente chamado de “economizador”, de fato produzia uma economia no ciclo do motor, ao aproveitar a temperatura do ciclo quente para o próximo ciclo. Ele revolucionou os motores movidos a ar de uma maneira surpreendente.

As diversas possibilidades de utilização do motor Stirling são muito interessantes para os seus avanços ao longo do tempo. A possibilidade de sua utilização em locais remotos é uma grande vantagem que poderá influenciar na sua implementação para a Geração de Energia Distribuída (GD) e outras aplicações.

A possibilidade de utilizar mais de uma fonte de calor, também, mostra a versatilidade do motor Stirling e possibilidades de aplicações. Biomassa, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), óleos, entre outros, são combustíveis facilmente difundidos no Brasil, e podem ser implementados nos mais diversos âmbitos.

Diante de toda a discussão apresentada, fica claro que o motor Stirling pode ser, sim, uma alternativa para a GD no Brasil. Ele tem diversas vantagens competitivas em relação a outros meios de produzir energia em baixa escala, sua praticidade e facilidade de aplicação o diferenciam muito de outras formas de se produzir energia.

### 3.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, um estudo comparativo prático do rendimento do motor Stirling para diferentes combustíveis. A implementação prática de um protótipo de circuito para geração de energia com o motor Stirling. Outra sugestão é o estudo das diversas máquinas térmicas tais como as apresentadas aqui.

## Referências

- ARSDALL, Brent H. Vanf. *Regeneradores O que são e como funcionam*. 2022. Disponível em: <https://www.stirlingengine.com/regenerators/>. Citado 1 vez na página 20.
- BARROS, Robledo Wakin et al. Avaliação teórica e experimental do motor Stirling modelo solo 161 operando com diferentes combustíveis. Universidade Federal de Itajubá, 2005. Citado 7 vezes nas páginas 17, 18, 21, 22, 26–28.
- CACHUTÉ, Liomar de Oliveira. Análise teórica e apresentação de metodologia de projeto de motor Stirling para uso em sistema de resfriamento evaporativo. Universidade de Taubaté, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19, 21.
- AL-CHUEYR, Lilian; MARTINS, Pereira. *HISTÓRIA DA CIÊNCIA: OBJETOS, MÉTODOS E PROBLEMAS History of Science: purposes, methods and problems*. Citado 1 vez na página 14.
- CORRIA, Maria Eugenia; COBAS, Vladimir Melian; LORA, Electo Silva. Perspectivas do uso de motores Stirling para geração distribuída no Brasil. Edição: Elsevier. Política de Energia, v. 34, 2006. Citado 1 vez nas páginas 24, 26, 30.
- COSTA, Adriano Souza da; SILVA, Franco Jefferds dos S. Projeto De Um Motor Stirling Solar Para Aplicação De Bombeamento E Irrigação Em Pequenas Propriedades, 2018. Citado 1 vez na página 29.
- CRUZ, Vinicius Guimarães da et al. Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo gama. Universidade Federal da Paraíba, 2012. Citado 1 vez na página 27.
- DARLINGTON, Roy; STRONG, Keith. Stirling and hot air engines. *Ramsbury: Crowood*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 18, 20.
- DUFFETT, Derek. Stirling Engines. A Brief Review of Loaded Hot Air. *The Waterworks Museum Hereford.*, 2014. Disponível em: <https://fredstarr.com/wp-content/uploads/5.-Stirling-Engines-Duffett.pdf>. Citado 6 vezes nas páginas 21, 22, 29–31.
- LAMPIS, Andrea et al. Dossier de Energia 2022. Brasil: um foco no setor elétrico. IADB: Inter-American Development Bank, 2022. Citado 1 vez nas páginas 12, 13.
- LEITE, Vitor Figueiredo. *Construção de um motor Stirling tipo beta com acionamento rômbico*. 2018. B.S. thesis – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Citado 1 vez na página 22.
- MANBY, C et al. Discussion. Heated Air Engines. In: THOMAS TELFORD-ICE VIRTUAL LIBRARY, 1853. MINUTES of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1853. v. 12, p. 591–600. Citado 2 vezes na página 21.

- MARCONI, Maria; LAKATOS, Eva. *Fundamentos de metodologia científica*. 2003. DOI: [10.1590/S1517-97022003000100005](https://doi.org/10.1590/S1517-97022003000100005). Citado 1 vez na página [14](#).
- MENDOZA, Luis Sebastian Castellanos. Modelagem de Sistemas de Geração de Eletricidade a partir de Energia Solar utilizando Pratos Parabólicos e Motores Stirling (Dish/Stirling)., 2012. Citado 1 vez na página [31](#).
- PAULA, Rafael Bergamasco. Projeto e avaliação teórica e experimental de sistemas de geração de eletricidade a partir da biomassa utilizando Motores Stirling., 2007. Citado 5 vezes nas páginas [12](#), [13](#), [23](#), [25](#), [28](#).
- REID, John S. Stirling stuff. *arXiv preprint arXiv:1604.02362*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas [19](#), [23](#).
- SCHIMID, Vitor Anecchini. Conhecendo As Microturbinas A Gás, 2014. Citado 1 vez na página [12](#).
- SILVA, Geilson Rodrigues da; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. Termodinâmica e Revolução industrial: Uma abordagem por meio da História Cultural da Ciência. *História da Ciência e Ensino: construindo interfaces*, v. 19, p. 71–97, 2019. Citado 3 vezes nas páginas [16](#), [17](#).
- SOUZA, Debora Samir Conceição de; CRUZ SILVA, Boniek Venceslau da. Termodinâmica e Revolução Industrial: Uma abordagem por meio da História e da Epistemologia da Ciência. *Latin-American Journal of Physics Education*, Instituto Politécnico Nacional, v. 15, n. 1, p. 14, 2021. Citado 2 vezes nas páginas [16](#), [17](#).
- STIRLING, Robert. Improvements for Diminishing the Consumption of Fuel, and in Particular an Engine Capable of Being Applied to the Moving (of) Machinery on a Principle Entirely New, No. 4081. *British Patent Office, London*, 1816. Citado 3 vezes nas páginas [19](#), [20](#), [26](#).
- THE Centenary Of The Heat Regenerator And The Stirling Air Engine. *The Engineer*, p. 516, 517, 1917. Citado 1 vez na página [20](#).
- WELTY, Stephen; CLARK, Dave; SIMMS, Adam. Assessment of a Commercially Available Stirling Engine for use in Solar Powered Distributed Energy Applications. *International Stirling Engine Committee*, 2009. Citado 1 vez na página [12](#).
- WILKE, Humberto; LORA, Electo Eduardo Silva. Desenvolvimento de um módulo combustor biomassa-motor stirling aplicado a sistemas de geração isolada e baseados em gerador de indução. *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, SciELO Brasil, 2004. Citado 2 vezes nas páginas [13](#), [22](#).
- WOODCROFT, Bennet (Ed.). *The pneumatics of Hero of Alexandria, from the original Greek*. Taylor, Walton e Maderly, 1851. Citado 1 vez na página [16](#).

# Anexos

# ANEXO A – The Engineer 1917

### THE CENTENARY OF THE HEAT REGENERATOR AND THE STIRLING AIR ENGINE.

The library of the Patent Office has recently been the recipient of the original specification in the handwriting of the inventor, the Rev. Robert Stirling, D.D., of the Heat "Regenerator," and the Stirling Air Engine (Letters Patent No. 4081 of 1816). For some reason, not definitely ascertained, this specification, though duly signed, attested and stamped, was not enrolled. Hence, it does not appear in the Official Blue-book series, and has always been treated as a lapsed application. It is now published *in extenso* for the first time, although it is known that copies of the Scotch specification were produced in evidence in the celebrated trials of the Neilson Hot-blast patent. It is, we believe, established that the first application of the regenerative principle to iron smelting by James Baird in 1825 was due to the suggestion of Robert Stirling, who, it is stated, had included "iron smelting furnace" in the original draft of his specification, but had struck out the words, and gave only one example, selecting a glass furnace for the purpose. This omission probably saved Neilson's patent, while it accounts for the fact that Stirling was not called to give evidence at the Edinburgh trial in spite of the pressure put upon him by the defendants. It should be observed that the term "regenerative furnace" was not coined by Stirling, who elsewhere stated that he preferred to describe his invention as an "Economiser," but the term coined by Ericsson was so firmly rooted in the language in Siemens' time that the latter accepted it under protest (Proc. Inst. C.E., vol. xii., 1852-3). Further, it is worthy of note that nearly all the applications of the regenerative principle in heating and cooling were foreseen by Stirling, and indicated by him in his specification.

The principle of the Stirling Air Engine differs from that of Sir George Cayley (1807), in which the air is forced through the furnace and exhausted, whereas in Stirling's engine the air works in a closed circuit. It was to it that the inventor devoted most of his attention. A two horse-power engine, built in 1818, for pumping water at an Ayrshire quarry, continued to work for some time, until a careless attendant allowed the heater to become overheated. This experiment proved to the inventor that, owing to the low working pressure obtainable, the engine could only be adapted to small powers for which there was at that time no demand. His younger brother, James Stirling, C.E., suggested, in 1824, using compressed air, and in 1843 built an engine of 45 brake horse-power, which successfully drove the machinery at the Dundee Foundry for several years, thus demonstrating the adaptability of the principle to higher powers.

It may be of interest to note here that Robert Stirling was born at Cloag, Methven, Perthshire, in 1790, and entered the Church. At the date of his invention, 1816, he was twenty-six years of age, and had just been ordained to his first parish. He was greatly esteemed as a minister, and was a noted classical scholar, as well as a scientist, and before he died, in 1878, was the Father of the Church of Scotland. His grandfather, Michael Stirling, of Glassingal, Dumblane, invented the first rotary thrashing machine in 1756 (*vide Encyclopædia Britannica*, third edition—Thrashing). His brother James was a celebrated Civil Engineer in Edinburgh, and four of his sons were engineers, who all made their mark in the engineering world. Two of them, Patrick and James, are well known in this country to locomotive engineers of the present generation.

#### SPECIFICATION OF STIRLING'S PATENT No. 4081 of 1816.

All my Improvements for diminishing the consumption of fuel consist of the different forms or modifications of a New Method, Contrivance, or Mechanical arrangement for heating and cooling Liquids, Airs or Gases, and other Bodies by the use of which Contrivance Heat is abstracted from one portion of such liquids, airs, and other bodies and communicated to another portion with very little loss; so that in all cases where a constant succession of heated liquids or other bodies is required, the quantity of fuel necessary to maintain or supply it is by this contrivance greatly diminished.—The First Modification of said Contrivance or arrangement is described as follows:—A B fig. 1st is a pipe, channel, or passage, formed of Metal, Stone, Bricks or other Materials according to circumstances *i.e.* according to the Chemical agencies of the bodies to be heated or cooled and the degree of heat in said bodies.—The Hot liquid, gas, or body to be cooled is by any means made to enter the passage at A and to pass along to its other extremity B.—In its progress it gives out its heat to the sides of the passage or to any bodies contained in it and issues at B at nearly the original temperature of the passage.—In this manner the extremity at A and a considerable portion of the passage is heated to nearly the temperature of the Hot liquid while the extremity B still retains its original temperature nearly. When the temperature of the passage at B has been raised a few degrees the motion of the fluid from A to B is stopped and a portion of fluid which is required to be heated and which is supposed to be a few degrees colder than the extremity of the passage at B is made to traverse the same passage in a contrary Direction *i.e.* from B to A; by which means it receives heat from the sides of the passage or other bodies contained in it and issues at A at nearly the same temperature with the fluid to be cooled. When the temperature of the passage at A has thus been lowered a few degrees, the process is again stopped and a portion of the fluid to be cooled is made to pass from A to B and so on alternately.—

The Second Modification of my said Contrivance or arrangement consists in interposing a thin plate of Metal or other materials, according to circumstances, between two currents of liquid gas or vapour which are made to run in opposite directions.—A B fig. 2nd represents such a plate, and *c, d,* two passages, between which it is interposed.—The fluid to be cooled is made to traverse the passage *d* from A to B and the fluid to be heated is made to traverse the passage *d* from B to A.—The extremity of the plate at A is kept Hot by the current in *d* and the extremity

B is kept cold by the current in *c*.—The plate A B abstracts the heat from the fluid in the passage *d* and communicates it to that in *c* with very little loss.—The waste or escape of heat from the passages is prevented by their being surrounded with Charcoal powder, wood, bricks or any substance that does not easily permit heat to pass through it, as is represented at *e, d, e, f,* fig. 1st and 2nd.—In the construction of the passages in both Modifications of my contrivance for heating and cooling liquids and other bodies the First form or Modification of my general Contrivance 1. When the passages are made of metal or any other substance that conducts or transmits heat easily I make the metal or other substance as thin as possible to prevent the heat from being transmitted in this manner from the hot to the cold extremity of the passages.—2. Liquids and airs being very imperfect conductors of heat I make the passages very narrow (at least in one direction) in proportion to their length, for the purpose of heating and cooling more completely the liquids or airs that pass through them.—A transverse section of the passages is given at A and B C fig. 3rd.—3. When the passages cannot be made sufficiently narrow I make their sides jagged or rough by bodies projecting from them as represented at fig. 4 or I adopt any similar method for promoting the internal motions of the fluids and the ready communication of heat to them or to the passage.—4. When the width of the passage cannot be sufficiently diminished I increase its length in order to attain the same end.—The form and construction of the tubes, passages and plates in both the modifications of my general Contrivance or Arrangement may be varied according to circumstances; but they must be derived from this contrivance arising from the fluids and other bodies to be heated and those to be cooled being made to move in opposite directions and it is for the invention or improvement of this arrangement that I have applied for and obtained His Majesty's Letters Patent.

Having thus described and ascertained the nature of my Invention I shall now describe several of its numerous and useful applications.—The First form or Modification of my general contrivance or arrangement may be applied to diminishing the consumption of fuel in Glass house and other furnaces wherever a high degree of heat is required, and the nature of the processes carried on in these furnaces admits of their being accurately closed, and this application is also capable of producing a much more intense heat than can be raised by the ordinary methods.—A fig. 5 is a furnace filled with fuel A, E G and A D E (*sic*), are two flues or passages (a transverse section of which is represented at A fig. 6). B is a passage for introducing the fuel accurately closed at C.—All other parts are likewise closed so that no air can pass through or have access to the fire but through said flues.—The air which supports the combustion is alternately introduced at F and G by blowing engines, bellows or any other means and the gases and vapours which arise from the fire pass off in an opposite direction leaving the greater part of their heat in the flues in the manner above described.—This heat is taken up by the air which supports the fire and is again sent to the opposite side of the furnace with the additional quantity of heat produced. In this manner the heat is accumulated in the furnace and the parts of the flues adjacent to it. The bodies to be heated are placed at D and E and the openings by which they are introduced are accurately closed. The furnace and flues are constructed of the best firebricks or any material that may better resist the intense heat, and the Mason work, as in other furnaces, is made sufficiently thick to prevent the waste of heat.—The form and arrangement of the furnace and flues may be varied according to circumstances; but it must be remembered that the narrower and longer the flues are and the more frequently the direction of the air is changed the greater is the saving of fuel and the intensity of the heat produced.

The Second form or modification of my invention may be applied to the saving of fuel in Breweries, Distilleries, Dye Works and other Manufactures, by transferring heat from one portion of liquid, air, or vapour to another.—No further directions seem to be necessary for these applications but this that the quantity of fluid which is allowed to run through the respective passages must be inversely proportional to the specific heat of the respective fluids which may be learned from books or from observing the degree to which they are respectively heated or cooled in their passage.—By either of the above described Modifications of my said Arrangement I construct my Engine, for moving Machinery and the following is a general description of the manner in which this is performed.—I employ the Expansion and Contraction (or either) of atmospheric air or any of the permanent gases by heat and cold to communicate motion to a piston or other similar contrivance.—In order to produce this expansion and contraction I cause the air to pass from a cold to a hot part of the engine and the contrary alternately either in the same passage in the manner described at the explanation of fig. 1st, or in different passages as described at fig. 2nd.—I apply fire to the warmest part of the engine, in order to supply the waste of heat occasioned by its transmission from the hot to the cold parts by the radiating and conducting power of the materials of which they are formed, by the change of capacity for heat which the air suffers from condensation and rarefaction, and by the impossibility of transferring the whole of the heat from the air to the passages and the contrary and I apply a stream of cold air or water to the coldest part of the engine to carry off said waste heat.—The passages are of course Hot at the one extremity and Cold at the other, and in passing through them the air is alternately heated and cooled or expanded and contracted.—The following is a particular description of that form of my engine which I consider as the best.—A D D fig. 7 is a cylinder composed of three parts accurately joined together by rivets or screws and rendered airtight by hammering or soldering the joinings.—The part A B is formed of cast iron and accurately bored, the part B C is made of sheet or cast iron as thin as possible (as one tenth of an inch), and the part C D is of Sheet or Cast iron.—To this cylinder is fitted a piston E E which is made airtight in the usual way, and provided with rods I I for communicating its motion.—F F G G is a hollow cylinder also as thin as possible made of sheet iron covered with thin plates of polished brass or silver to prevent the waste from radiation and divided into compartments by plates *b, b,* for the same purpose.—It is shut on all sides and airtight, kept at a small distance from the outer cylinder by wheels *a, a,* or any similar contrivance and furnished with a rod H working through a stuffing in the centre of the piston, by means of which it is moved up and down.—This inner cylinder I call the Plunger.—The part B D of the outer cylinder is kept hot by the flame or heated air of a fire C applied at B, made to descend on the sides of the cylinder to C and allowed to expand to *c,* the part A B is kept cool by a stream of air or water directed upon it, and the part B C increases in temperature from B to C.—The temperature of the plunger increases from F to G and the interval between the cylinder and plunger is partially filled with wires wound round the latter and kept at a small distance from it and from one another by wires laid along it at right angles to the former, in order to heat and cool the air more completely.—This interval is on each side about one fifth of the whole diameter of the cylinder.—Figures 7 and 8 are drawn to a scale of one half inch to a foot except the thickness of the metal which is to be sealed. The space contained by the cylinder and piston is filled with atmospheric air.—Figure 8 is an elevation of the engine.—A B C the cylinder D D pillars supporting it, E E a beam centred at G to which the rods I I of the piston are connected by a parallel joint N N; *f f* an arm which connects said beam to the crank *g, g* is a bent lever jointed to said arm at *o* and connected to the fixed point A by the rod *l,* and to the other extremity of the beam F F by the rod *k*.—This beam is also centred at G and moves between two plates *r, r* similar to those of which the beam E E is composed, the rod *l* is jointed to the bent lever *g, g* of the plunger M a slider upon the rods of the piston fixed to the rod of the plunger to render its motion steady and parallel.—*h h h* the fly upon the same axle with the crank.—*c d e* the furnace and flues.

The Operation of the engine is explained as follows.—The part of the cylinder surrounded by the flues is heated to a temperature of 480° higher than the part A B.—In the position represented at fig. 8 the plunger is in contact with the piston, by which means the included air is brought to the warm part of the cylinder has its elasticity increased and presses upon the piston with a force greater than that of the atmosphere.—The piston is thus forced downwards and the rod *f f* and crank *g, g* upwards till the pressure of the included air and that of the atmosphere become equal. The impulse communicated to the fly carries the end of the crank towards *g,* and the arm *f f* and bent lever *i i* are brought to such a position as to depress the rod *k* and thus to raise the plunger from the piston.—The included air is thus made to descend between the plunger and cylinder and brought to the cold part; it is cooled in its descent, has its elasticity diminished, and its pressure becomes less than that of the atmosphere, the piston is forced upwards, and the crank downwards.—The revolution of the fly and crank again bring the plunger towards the piston, the air ascends through the same passage by which it descended, is heated in its ascent and forces the piston downwards and the crank upwards, and so on alternately.—In this manner a rotatory motion is produced which may be applied to the moving of machinery.—The force of the engine is regulated by allowing a portion of air to escape outwards and inwards by a small cock which is opened and shut by a governor as in Steam engines, and placed in the cold part of the cylinder immediately above the highest ascent of the piston.—The distance which the rod of the plunger H fig. 7 moves through the piston I call the Stroke of the plunger and I make it equal to that of the piston when the difference of temperature in the hot and cold parts of the cylinder is 480°.—When the difference is less than 480° I make the stroke of the plunger proportionally greater than that of the piston, and the contrary when the difference is greater.—The length of the arms of the bent lever *i i* and of the rod *k* which is necessary to make the plunger just touch the piston on the one hand and the upper end of the cylinder on the other I determine by experiment as being the most convenient method known to me.—I do not answer for the absolute correctness of those in the plan.—The cylinder is inverted to prevent the oil used to make the piston airtight from getting to the hot part and wasting the heat. In the foregoing description, wherever I have specified more than one Material or more than one Method of performing the same thing, I have placed that first to which I give the preference; but I reserve to myself the power of using any materials and applying my new contrivance for heating and cooling bodies, to the purposes to which it is applicable in any form or manner which further experience may prove to be advantageous and which is not inconsistent with the terms of his Majesty's Letters Patent.

In witness whereof I the said Robert Stirling have hereunto set my hand and seal this Twentieth day of January in the year of our Lord one thousand eight hundred and seventeen.

Signed sealed and delivered  
in presence of [Seal of R.S.] Robt. Stirling  
(Rob. Cameron) Accountant in Edinburgh,  
(Francis F. Cameron) Preacher of the Gospel in Edinburgh.

### SOME NOTES ON RECENT GERMAN AEROPLANES.

THROUGH the courtesy of the Air Board we have been afforded an opportunity of studying and acquiring some first-hand information regarding certain types of recently constructed German aeroplanes and aero-engines. The collection is housed in a conveniently situated building where it is, and has been for some time, open to the aeroplane designers of this country for their inspection. It may be described as a museum of aerial war relics, for it comprises exhibits of German aeroplanes and aero-engines that have been brought down by the British forces, or have otherwise fallen into our hands. The policy of those directing the exhibition—if we may use that word of a collection that is not open to the general public—is to endeavour so far as possible to reconstruct a machine or engine of each type from the undamaged parts of as many of the same class as are required to afford a complete example. Sometimes, of course, a practically undamaged machine or engine will be obtained. At others, the damage may be so great that the patient collection of separate details from many different machines or engines is necessary before a complete example of the type can be reconstructed. In addition to such exhibits, a duplicate set of separate parts properly sectioned or otherwise cut up to reveal the construction is shown for each aeroplane or aero-engine. The collection is naturally an expanding one, and certain gaps—although they are wonderfully few—have yet to be filled, even among the exhibits already shown. Being intended to serve a strictly utilitarian purpose, the exhibition does not include Zeppelin relics. For quite another reason it is confined to aeroplanes and does not include, so far, a single seaplane or part of one.

There would be little excuse for us were we to enter into a long account of the multifarious details of construction to be examined at the exhibition. It may be taken for granted that whatever of these details are novel and instructive have been duly noted already by those who will know how to profit by them. From the general point of view, however, there are several points presented by the exhibits that will, no doubt, be of interest to the average engineer, and to these we will confine our attention.

Among the engines, the most striking feature in our eyes is the sign afforded by the exhibition of the German's strong attachment to water cooling. The Fokker machines, it is true, adopted the Gnome rotary air-cooled engine—or the Gnome engine in all but the name\*—but the Halberstadt, the Albatross, the Aviatik, the L.V.G., the Rumpler, the Gotha, and so on, are all equipped with either the Benz or the Mercedes six or seven-cylinder water-cooled engine of the motor car type. This tendency, we suppose, is an illustration of German mentality, for the fact is that in the German aero-engine competition of 1912-13†, air-cooled engines were completely out-

\* The Gnome engine in Germany is known as the Oberursel.

† See THE ENGINEER for November 21st and December 5th, 1913.

STIRLING'S REGENERATOR AND HOT-AIR ENGINE OF 1816

(For description see opposite page)

Figure 1<sup>st</sup>

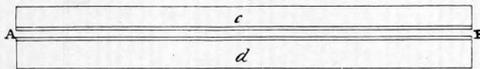


Fig 2<sup>d</sup>

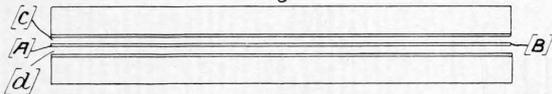


Fig 3<sup>d</sup>

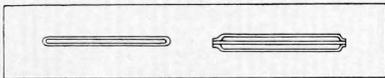


Fig 4<sup>th</sup>

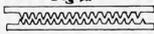


Fig 5<sup>th</sup>

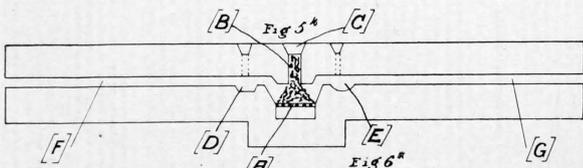
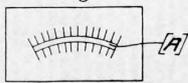


Fig 6<sup>th</sup>



Letters in square brackets are references in the text of the specification which do not appear in the original drawings.

"THE ENGINEER"

Fig 7

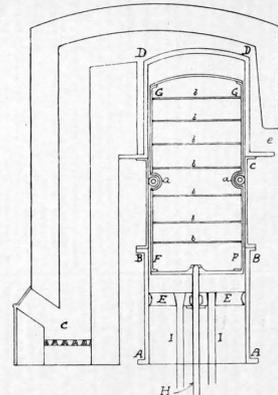
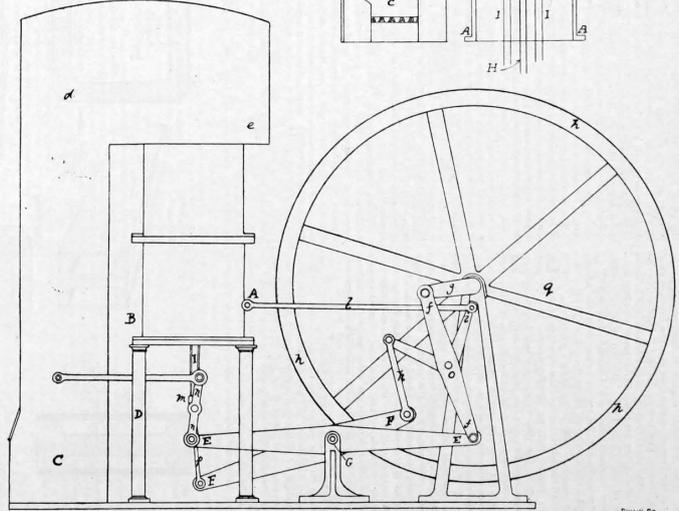


Fig. 8.



SWAN SC.